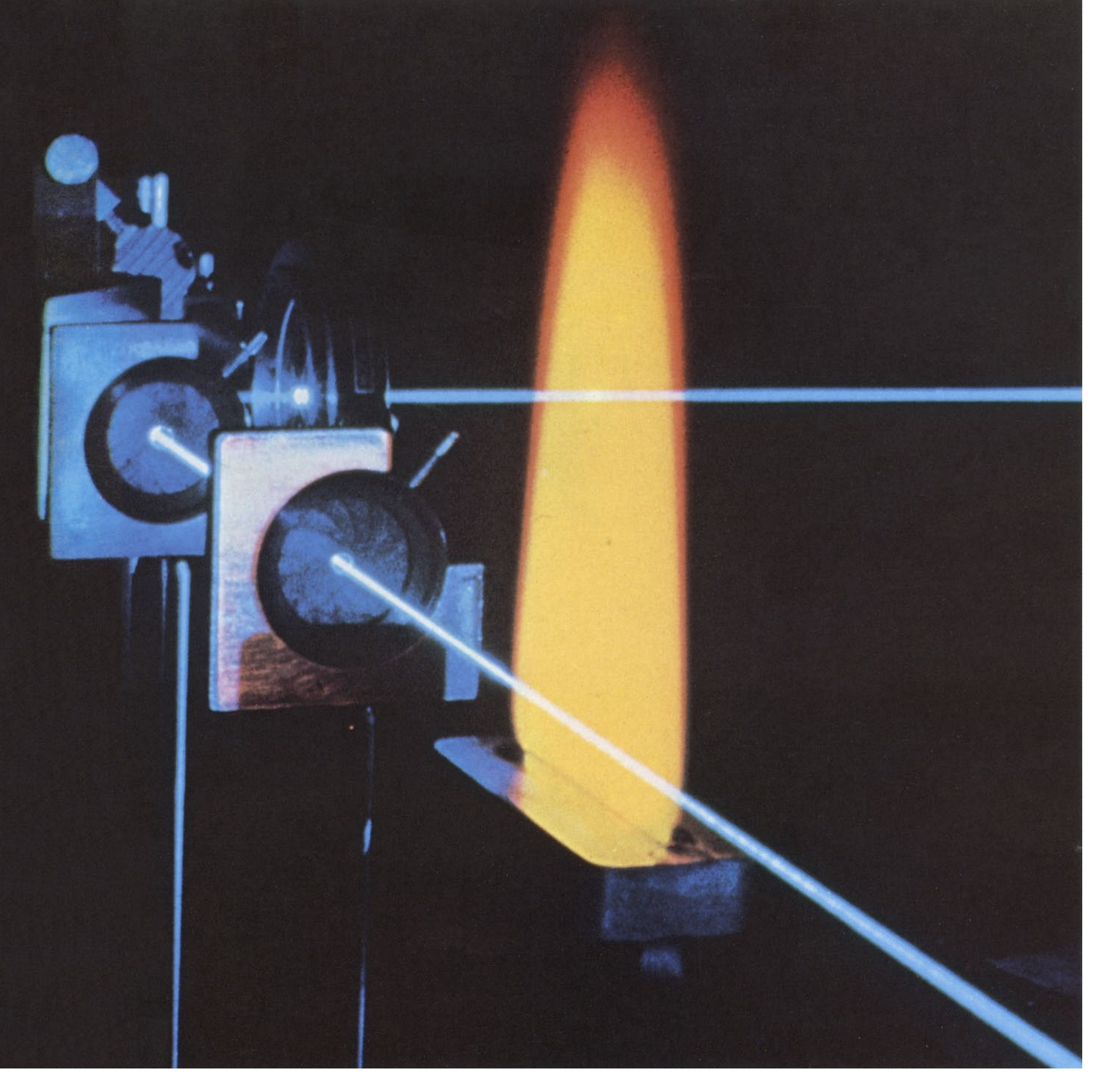
# INVESTIGACION Y CIENCIA

*Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN



QUIMICA DE LA LLAMA

*Abril 1982*

300 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

*Número 67*
*Abril 1982*

INVESTIGACION Y
# CIENCIA
*Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

**Colaboradores de este número:**

*Asesoramiento y traducción:*

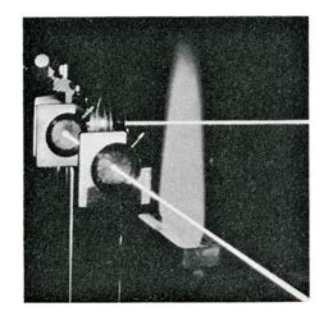
Angel Crespo Díez: *Radiaciones ionizantes a bajo nivel y sus efectos biológicos*; Emiliano Aguirre: *Las pisadas fósiles de Laetoli*; Isabel García Acha y J. Rodríguez Villanueva: *Así entra y sale de su hospedador un virus animal*; Manuel Puigcerver: *Titán*; Joan Grimalt Obrador: *Química de las llamas*; Manuel Puigcerver Zanón: *Los quasars, sondas del universo distante y primitivo*; Joandomènec Ros: *Visión de los colores en los peces*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

*Ciencia y sociedad:*

Manuel Ballester, José A. Cabezas y Pedro Pascual

*Libros:*

Francisco Sánchez, Arturo Valls, Luis García Ballester y Diego Gracia



## LA PORTADA

La fotografía de la portada muestra un dispositivo experimental desplegado para estudiar una llama a través de un rayo láser. Entre las ventajas de este método de diagnóstico se cuenta la de no alterar el esquema de flujo de los gases implicados. Se trata de una llama premezclada laminar, es decir, una llama lisa en la que el combustible (en este caso metano) se mezcla con aire antes de entrar en la zona de combustión. Un rayo láser azul pasa a través de la llama, excitando la fluorescencia verde (no visible aquí) de grandes moléculas hidrocarbonadas aromáticas (en forma de anillo); moléculas que quizás fueran precursoras de carbonilla. La formación de la carbonilla es hoy uno de los procesos más activamente estudiados en la química de la llama (véase "Química de las llamas", por William C. Gardiner, Jr., página 58). La fotografía la tomó Fritz Goro en el Fire Research Center del National Bureau of Standards.


*Suscripciones:*
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

*Condiciones de suscripción:*

España:
Un año (12 números): 3.300 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
340 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
440 pesetas

*Distribución para España*

Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

*Distribución para los restantes países:*

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

*Publicidad:*

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.°, Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado
por O.J.D.





## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de portada cortesía de Jim Sonnichsen, National Bureau of Standards

| Página | Fuente |
|---|---|
| 7-15 | Jerome Kuhl |
| 17 | John Reader, © National Geographic Society |
| 18 | Richard L. Hay, Universidad de California en Berkeley |
| 19-21 | Andrew Tomko |
| 22 | Mary D. Leakey |
| 23 | Richard L. Hay, Universidad de California en Berkeley |
| 27 | Carl-Henrik von Bonsdorff, Universidad de Helsinki |
| 28-29 | Bunji Tagawa |
| 30 | Kai Simons, Henrik Garoff y Jürgen Kartenbeck, Laboratorio Europeo de Biología Molecular: Ari Helenius, Yale |
| 31-35 | Bunji Tagawa |
| 40 | Manuel Ballester |
| 47-48 | Jet Propulsion Laboratory, Instituto de Tecnología de California |
| 49 | Walken Graphics |
| 50 | Jet Propulsion Laboratory, Instituto de Tecnología de California |
| 51-55 | Walken Graphics |
| 59 | Fritz Goro |
| 60 | Fritz Goro (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*) |
| 61-68 | Ian Worpole |
| 69 | Robin Stevenson, General Motors Research Laboratories |

| Página | Fuente |
|---|---|
| 73 | Malcolm G. Smith, Royal Observatory, Edimburgo |
| 74-77 | Alan D. Iselin |
| 78 | Observatorio Interamericano de Cerro Tololo |
| 79 | © 1960 National Geographic Society-Palomar Sky Survey, reproducido con permiso del Instituto de Tecnología de California (*arriba*); Alan D. Iselin (*abajo*) |
| 80-82 | Alan D. Iselin |
| 85 | Joseph S. Levine, Boston College; Edward F. MacNichol, Jr., Marine Biological Laboratory, Woods Hole (*arriba*); George V. Kelvin (*abajo*) |
| 86-93 | George V. Kelvin |
| 94 | Joseph S. Levine, Boston College; Edward F. MacNichol, Jr., Marine Biological Laboratory, Woods Hole, Massachusetts (*arriba, izquierda*); George V. Kelvin (*arriba derecha y abajo*) |
| 96 | J. Ravenet |
| 98-99 | J. Ravenet y Miguel Alonso |
| 100 | J. Ravenet |
| 101-105 | J. Ravenet y Miguel Alonso |
| 116 | Jearl Walker |
| 117-121 | Michael Goodman |


ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

# Los autores

ARTHUR C. UPTON ("Radiaciones ionizantes de bajo nivel y sus efectos biológicos") preside el Instituto de Medicina Ambiental de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York. Cursó la carrera, y posterior especialización en patología, en la Universidad de Michigan. De 1951 a 1969 formó parte del equipo del Oak Ridge National Laboratory. En 1969 fue nombrado profesor de patología de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, puesto que ocupó hasta 1977. De 1977 a 1979 fue director del Instituto Nacional del Cáncer. Desde su estancia en Oak Ridge, Upton se ha interesado por los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes, las causas del cáncer y la biología del envejecimiento.

RICHARD L. HAY y MARY D. LEAKEY ("Las pisadas fósiles de Laetoli"), geólogo y antropóloga, respectivamente, vienen colaborando en el estudio de los antecesores del hombre en Tanzania desde 1962. La contribución de Hay ha consistido en elaborar la estratigrafía, sedimentología y paleoambientes de los depósitos volcánicos en que se encuentran los fósiles de homínidos. Pasó por el Ursinus College, la Universidad del Noroeste y la de Princeton. Ha enseñado en la Universidad estatal de Louisiana y trabaja actualmente en la Universidad de California en Berkeley. Ha estudiado depósitos de ceniza volcánica en el Oeste de los Estados Unidos, Hawai, Japón, Kenya y San Vicente, en las Indias Occidentales. Entre sus aficiones no profesionales se cuenta la pesca de la perca rayada y la búsqueda y pulimento de jade. Mary Leakey recibió educación privada en Inglaterra. Visitó por primera vez Olduvai y Laetoli con su difunto marido, Louis B. Leakey, en 1935. Ha dedicado casi toda su carrera a la paleantropología del Africa Oriental; junto con Louis Leakey realizó algunos de los más importantes descubrimientos de restos de homínidos en Africa.

KAI SIMONS, HENRIK GAROFF y ARI HELENIUS ("Así entra y sale de su hospedador un virus animal") son biólogos celulares, particularmente interesados en el movimiento de sustancias a través de la membrana de la célula. Hasta hace poco trabajaban juntos en el Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL) de Heidelberg. Simons, científico de número del EMBL, se recibió de doctor en medicina por la Universidad de Helsinki en 1964. Realizó trabajos postdoctorales en la Universidad Rockefeller, donde comenzó sus estudios sobre el virus de Semliki Forest, el virus animal a que se refiere su presente artículo. En 1967 regresó a la Universidad de Helsinki, y allí permaneció hasta 1976, cuando entró a formar parte de la plantilla del EMBL. Garoff y Helenius se incorporaron al equipo de investigación de Simons en sus años estudiantiles de la Universidad de Helsinki. Ambos investigaron sobre el virus de Semliki Forest durante la realización de su doctorado, grado que alcanzaron en 1973 (Helenius) y 1974 (Garoff). En 1974 acompañaron a Simons al EMBL, donde continuaron su trabajo sobre el virus. Garoff dirige ahora su propio equipo de investigación del EMBL. Helenius se trasladó el año pasado a la Universidad de Yale para enseñar biología celular.

TOBIAS OWEN ("Titán") es profesor de astronomía de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Sus títulos de primer ciclo y licenciatura, ambos en física, los obtuvo en la Universidad de Chicago, doctorándose en astronomía por la Universidad de Arizona en 1965. Ha sido miembro del grupo de ciencia de construcción de imágenes para las misiones *Voyager 1 y Voyager 2*. Escribe: "Mi participación en las misiones Voyager me proporcionó la oportunidad, totalmente inesperada, de ver de cerca y obtener información detallada acerca de objetos que conocí primero como puntos de luz en los cielos nocturnos de mi niñez".

WILLIAM C. GARDINER, JR. ("Química de las llamas"), enseña química en la Universidad de Texas en Austin. Se formó en las universidades de Princeton y Harvard (doctorado). De 1955 a 1957 fue investigador asociado en el Instituto Max Planck de Física Química de Göttingen. En 1960 se trasladó a la Universidad de Texas, volviendo al Instituto Max Planck en 1975 y 1976 como becario Guggenheim. Los objetivos de sus investigaciones van desde ondas de choque y detonación hasta la combustión y espectroscopía de resonancia de spin, pasando por la fotoquímica de rayos láser.

PATRICK S. OSMER ("Los quasars, sondas del universo primitivo y distante") es director del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile. Se graduó en astronomía por el Instituto Case de Tecnología, doctorándose, también en astronomía, por el Instituto de Tecnología de California en 1970. Comenzó trabajando en Cerro Tololo, en 1969, como ayudante de investigación, y el pasado año fue nombrado director. El observatorio es la sede de un telescopio de cuatro metros, instalado en la década de 1970, el mayor del hemisferio Sur. Sus líneas de investigación incluyen las atmósferas de estrellas muy luminosas, las nubes magallánicas y las fuentes estelares de rayos X. Los quasars han recabado su interés desde 1974.

JOSEPH S. LEVINE y EDWARD F. MACNICHOL, JR. ("La visión del color en los peces"), son fisiólogos sensoriales con un especial interés por los animales acuáticos. Levine da clases de biología en el Boston College y colabora en los programas de investigación del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, Massachusetts. Frecuentó las universidades de Tufts y de Boston, licenciándose por esta última en 1976, con una tesis sobre la acuicultura de los bogavantes. Se doctoró en biología por la Universidad de Harvard en 1980. MacNichol dirige el laboratorio de fisiología sensorial de Woods Hole y enseña fisiología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Boston. Tras su licenciatura por la Universidad de Princeton, en 1941, se incorporó al Laboratorio de Radiación del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se doctoró por la Universidad Johns Hopkins en 1952. Hace tiempo que se interesa por la medición de la actividad eléctrica de neuronas aisladas. Sus estudios iniciales incluyen algunos de los primeros registros intracelulares de las células fotorreceptoras del ojo lateral de la cacerola de las Molucas. MacNichol abandonó Johns Hopkins en 1968, al ser nombrado director del National Institute of Neurological Diseases and Stroke, cargo que ocupó hasta 1973.

JUAN RAVENET CATALAN ("Silos") es doctor ingeniero industrial por la Universidad Politécnica de Barcelona, título que obtuvo en 1974 con una tesis en la que determinaba las sobrepresiones en las paredes de los silos debidas al vaciado y en función de la situación de la boca de salida. Ha escrito dos libros: el primero sobre teoría de silos y el segundo sobre accidentes en silos. El flujo de vaciado de productos pulverulentos cohesivos continúa absorbiendo su atención investigadora y profesoral.

# Hace...

José M.ª López Piñero

*... cuatrocientos cincuenta años*

Gonzalo Fernández de Oviedo fue nombrado cronista de Indias. Había nacido en Madrid el año 1478, en el seno de una familia hidalga de origen asturiano. Entró muy joven como paje al servicio de un sobrino de Fernando el Católico y, más tarde, fue nombrado mozo de cámara del príncipe don Juan. Presenció la rendición de Granada y el regreso de Colón, tras su primer viaje a América, y conoció a los hijos del descubridor, que eran pajes del príncipe. Al fallecer éste, residió durante algún tiempo en Italia y España. En la primavera de 1514 marchó a las Indias con varios cargos, entre ellos, "la escribanía de minas e del crimen" y el "oficio del hierro de los esclavos e indios", a los que acumuló después el de "veedor de las fundiciones", todos ellos en el "reino de la Tierra Firme que llaman Castilla del Oro". Tras una estancia de año y medio, volvió a la metrópoli, produciéndose entonces, como afirma Pérez de Tudela, su violento choque con Las Casas, que lo acusó de ser "partícipe de las crueles tiranías que en... Castilla del Oro se han hecho". Posteriormente, Fernández de Oviedo volvió a realizar otros cuatro viajes a América, en la que permaneció un total de veintidós años. Falleció el año 1557 en la ciudad de Santo Domingo.

Después de su segunda estancia en el Nuevo Mundo, Fernández de Oviedo publicó el *Sumario de la Natural Historia de las Indias* (1526), que dedicó a Carlos I, como un adelanto del "tratado que tengo copioso de todo ello". Había comenzado ya, en efecto, a redactar su *Historia General y Natural de las Indias*, cuya primera parte fue impresa en 1535, no editándose completa hasta 1851.

En contraste con las noticias ocasionales de los primeros descubridores, viajeros y conquistadores, Fernández de Oviedo aspiró a ofrecer una imagen de conjunto de la naturaleza americana. El *Sumario*, tras una breve noticia acerca de la navegación al Nuevo Mundo, trata sucesivamente de la Española, de Cuba y de otras islas del Caribe, y de Tierra Firme. En cada uno de estos territorios, se ocupa de los habitantes y, con mayor amplitud, de los animales y vegetales, mientras que los minerales, con la excepción del oro, merecen muy escasa atención. En la *Historia*, esta ordenación geográfica es sustituida por otra inspirada en Plinio: en primer término, los vegetales, subdivididos en plantas cultivadas, árboles frutales, silvestres y medicinales, arbustos y hierbas; en segundo lugar, los animales, comenzando por los terrestres, seguidos de los acuáticos, de los aéreos y de los insectos.

El interés fundamental de su obra reside, sin embargo, en que está basada en la observación de la naturaleza y no en noticias indirectas como las reunidas por Pedro Mártir de Anglería, del que dice el propio Oviedo: "deseaba escribir lo cierto si fielmente fuera informado, mas como habló de lo que no vido... sus *Décadas* padecen muchos defectos". Su objetividad en este terreno fue reconocida hasta por Las Casas, el encarnizado enemigo que no había dudado en insultarlo como "falso", "hipócrita", "malvado" y "mentiroso" en cuestiones de gobierno: "Lo que yo creo de la escritura de Oviedo –afirma– y de toda su parlería por lo que dice de los árboles y hierbas desta isla (Española), que escribe verdad porque las vido y las ven cuantos verlas quieren, y así será lo que escribiera de la Tierra Firme". En contraste con la erudición, a menudo agobiante, de Las Casas, Oviedo carecía de formación académica y, según su rival, no sabía "qué cosa era latín" y hasta su admirado Plinio lo tenía, "no en latín, sino en toscano". Ello favoreció, sin duda, el carácter directo y espontáneo de sus descripciones, en ocasiones esquemáticas como las figuras que incluye en su obra, muchas veces con finos detalles de observación, pero siempre basadas en la realidad. "Oviedo –afirma Cohen– se ha hecho famoso como observador perspicaz y por su agudo sentido de la descripción, basado en una honrada actitud crítica". Para conocer su labor, más que dar noticia de las innumerables especies que estudia, parece interesante ofrecer un ejemplo. He aquí su descripción del oso hormiguero:

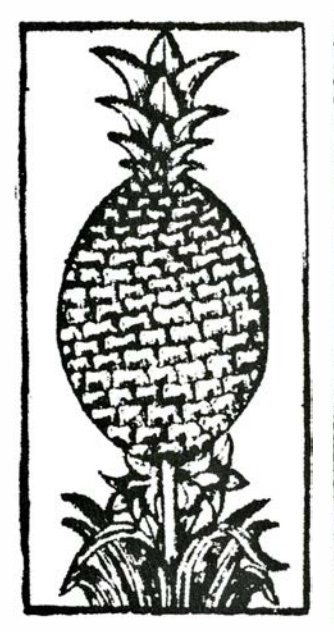
"El oso hormiguero es cuasi a manera de oso en el pelo, y no tiene cola; es menor que los osos de España, y cuasi de aquella facción, excepto que el hocico tiene muy más largo, y es de muy poca vista. Tómanlos muchas veces a palos, y no son nocivos, y fácilmente los toman con los perros, y conviene que con diligencia los socorran antes que los perros los maten, porque no se saben defender, aunque muerden algo. E hállanse lo más continuamente cerca de los hormigueros de torronteros, que hacen cierta generación de hormigas muy menudas y negras en las campañas y vegas rasas que no hay árboles, donde por estinto natural ellas se apartan a criar fuera de los bosques, por recelo de este animal; el cual, como es cobarde y desarmado, siempre anda entre árboles y espesuras, hasta que la hambre y necesidad, o el deseo de apacentarse de estas hormigas, le hace salir a los rasos a buscarlas. Estas hormigas hacen un torrontero tan alto como un hombre y poco mas, y algunas veces menos, y grueso como una arca cortesana, y a veces como una pipa, y durísimo como piedra, y parescen estos tales torronteros cotos o mojones de términos; y debajo de aquella tierra durísima de que están fabricados hay innumerables o casi infinitas hormigas muy chiquitas, que se pueden coger a celemines quebrando el dicho torrontero; el cual, de haberse mojado con la lluvia, y tras el

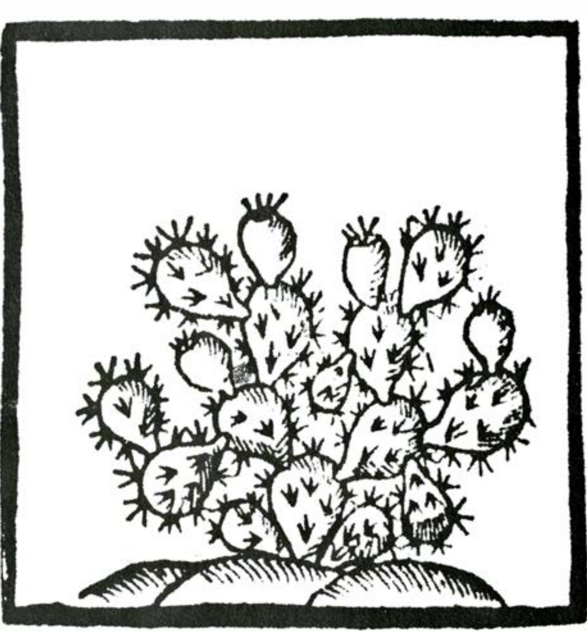


*Explotación del "oro virgen" u oro nativo, que "habéis de entender se halla en los ríos de agua y en las costas de ellos, y en el monte y en las quebradas y en sabanas como agora lo iré particularizando."*

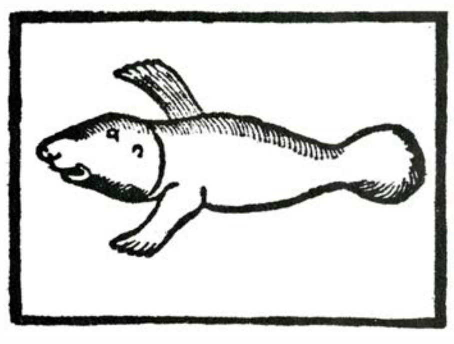
agua sobrevenir la calor del sol, algunas veces se resquiebra, y se hacen en él algunas hendeduras, pero muy delgadísimas, y en tanta delgadez, que un filo de un cuchillo no puede ser más delgado; y paresce que la natura les da entendimiento o saber para hallar tal materia de barro estas hormigas, que pueden hacer aquel torrontero que es dicho tan durísimo, que no paresce sino una muy fuerte argamasa; lo cual yo he experimentado y los he hecho romper; y no pudiera creer sin verlo la dureza que tienen, porque con picos y barretas de hierro son muy dificultosos de deshacer, y por entender mejor este secreto, en mi presencia lo he hecho derribar; lo cual, como es dicho, hacen las dichas hormigas para se guardar de aqueste su adversario o oso hormiguero, que es el que principalmente se debe cebar y sustentar de ellas, o les es dado por su émulo, a tal que se cumpla aquel común proverbio que dice que no hay criatura tan libre a quien falte su aguacil. Este que la natura le dio a tan pequeño animal, tiene esta forma para usar su oficio en las escondidas hormigas, ejecutando su muerte, que se van al hormiguero que es dicho, y por una hendedura o resquebrajo tan sotil como un filo de espada, comienza a poner la lengua, y lamiendo, humedesce aquella hendedura por delgada que sea; y son de tal propriedad sus babas, y tan continua su perseverancia en el lamer, que poco a poco hace lugar, y ensancha de manera aquella hendidura, que muy descansada o anchamente y a su voluntad, mete y saca la dicha lengua en el hormiguero, la cual tiene longuísima y desproporcionada según el cuerpo, y muy delgada; y después que la entrada y salida tiene a su propósito, mete la lengua todo lo que puede por aquel agujero que ha hecho, y estáse así quedo grande espacio; y como las hormigas son muchas y amigas de la humedad, cárganse sobre la lengua grandísima cantidad de ellas, y tantas, que se podrían coger a almuerzas o puños; y cuando le paresce que tiene hartas, saca presto la lengua, resolviéndola en su boca, y cómeselas, y torna por más. E desta forma come todas las que él quiere y se le ponen sobre la lengua. La carne de este animal es sucia y de mal sabor; pero como las desaventuras y nescesidades de los cristianos en aquellas partes, en los principios, fueron muchas y muy extremadas, no se ha dejado de probar a comer; pero háse aborrescido tan presto como se probó por algunos cristianos. Estos hormigueros tienen por debajo a par del suelo la entrada a ellos, y tan pequeña, que con dificultad mucha se hallaría si no fuese viendo entrar y salir algunas hormigas; pero por allí no las podría dañar el oso, ni es tan a su propósito ofenderlas como por lo alto en aquellas hendeduricas, según que está dicho."

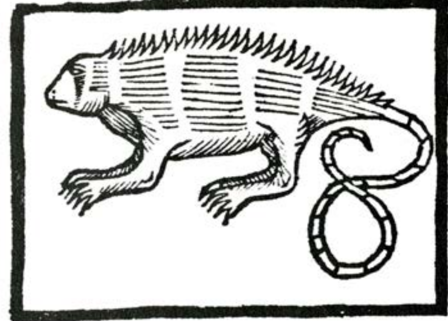
El *Sumario* fue traducido al inglés y al italiano. La *Historia*, al alemán, francés, inglés, italiano y latín, alcanzando en un siglo 15 ediciones. Las 14 que ha tenido durante la pasada centuria y la actual, también en diversos idiomas, reflejan su estimación como texto "clásico" científico de importancia, que abrió, como afirma Alvarez López, "ante los asombrados ojos de los europeos, el pórtico de una naturaleza desconocida".





*La "piña de Indias" o americana (***Ananas sativus** *L.). "Porque paresce piña, las llaman los cristianos piñas, sin lo ser. Esta es una de las más hermosas fructas que he visto en todo lo que del mundo he andado." La "tuna" o higuera chumba (***Opuncia tuna** *Mill). "Llevan unos muy donosos higos (que es su fructa), largos e verdes, e algo en partes colorado por defuera el cuero dellos, e tienen unas coronillas hundidas, como las níspolas de Castilla. E de dentro son coloradas mucho, que tiran a rosado, llenas de granillos."*





*El "manatí" (***Trichechus manatus** *L.). "Destos ni Plinio, ni Alberto Magno escribió, ni en España les hay. Ni jamás oí a hombre de la mar ni de la tierra que dixere haberlos visto ni oido, sino es en estas islas e tierra firme de estas Indias de España... La cabeza es como de un buey o mayor. Tiene los ojos pequeños y no tienen orejas, sino unos agujeros pequeños por oídos. El cuero paresce como de un puerco que está pelado o chamuscado por el fuego. Es la color parda e tiene algunos pelicos raros... Tiene dos tetas en los pechos, el que es hembra, e así pare dos hijos e los cría a la teta." La "iuana" o iguana (***Cyclura lophoma**, *Gosse). "Para quien no le conosce, es de fea e espantosa vista, e extraño lagarto, grande e de cuatro pies; mas es muy mayor que los lagartos de España... Tiene por medio del espinazo, levantado, un cerro encrestado a manera de sierra de espinas, e paresce en sí sola muy fiera. Tiene agudos dientos e un papo luengo e ancho que le va e cuelga desde la barba al pecho, como el buey. Y es tan callado animal, que ni grita, ni gime, ni suena, y está atado a doquier que le pongan, sin hacer mal alguno ni ruido."*

# Radiaciones ionizantes de bajo nivel y sus efectos biológicos

*¿Qué riesgo comporta para el hombre la ubicua radiación a bajo nivel de fuentes naturales o artificiales? Las pruebas de que se dispone señalan que, comparado con otros peligros, éste es leve*

Arthur C. Upton

A lo largo de toda nuestra vida nos hallamos sumergidos en radiación ionizante de bajo nivel procedente de fuentes naturales. Exposición que viene a doblarse con la radiación de fuentes creadas por el hombre, de índole médica sobre todo. Y puesto que la radiación induce tumores y alteraciones genéticas, la pregunta es inmediata: ¿Qué grado exacto de peligrosidad presenta la radiación de bajo nivel que dimana del medio y de las fuentes artificiales? La cuestión ha implicado muchos años de investigación, cuyos resultados ponen de manifiesto que el riesgo, caso de ser real, carece de entidad suficiente para detectarse. Así pues, comparado con otros peligros a que la población se halla expuesta en su quehacer diario, la amenaza global de toda la radiación ionizante a bajo nivel no debería constituir motivo alguno de mayor preocupación.

Relacionada con el tema es la cuestión de los umbrales: ¿Es siempre acumulativo el efecto que produce la radiación ionizante a bajo nivel? ¿Sólo perjudica cuando ésta sobrepasa determinado valor umbral? Las pruebas que podrían aducirse para resolver las preguntas se tornan aquí más ambiguas. Está demostrado que, para determinados tipos de radiación y ciertos efectos, el impacto de la radiación es acumulativo. Mas, para otros, la probabilidad se inclina por los que postulan la existencia de un umbral.

A diferencia de otras formas de energía radiante, la ionizante aporta, al material que la absorbe, suficiente energía localizada para ionizar átomos y moléculas que encuentre en su trayecto. (Por ionización se entiende la acción de eliminar o añadir electrones.) Hay una radiación ionizante electromagnética y está la constituida por partículas subatómicas de distintas masas y cargas. Comprende la primera rayos X y rayos gamma, que se caracterizan por poseer longitudes de onda relativamente cortas y frecuencias altas. Las radiaciones de partículas engloban electrones, protones, neutrones y partículas alfa.

Las cantidades y dosis de radiación ionizante se miden en varias unidades. La más antigua de éstas es el roentgen, que representa una medida de la cantidad de ionización inducida en el aire. Las principales unidades empleadas para expresar dosis absorbidas por los tejidos son el rad (donde un rad equivale a 100 erg por gramo de tejido) y el gray (que equivale a un joule por kilogramo de tejido, es decir, 100 rad). Para una determinada dosis, las radiaciones de partículas suelen provocar más daño que el producido por rayos X o gamma, justificándose así la introducción de otras unidades, el rem y el sievert, que permiten catalogar las dosis de los distintos tipos de radiación en razón de sus efectos biológicos. En una primera aproximación llamaremos rem a la cantidad de radiación —no importa el origen— que produce un efecto biológico equivalente al que causa un rad de radiación gamma. De forma similar, un sievert será la cantidad de radiación de cualquier tipo equivalente, en efecto biológico, a un gray de radiación gamma. De donde un sievert valdrá 100 rem. Las unidades empleadas para expresar dosis colectivas son el rem-persona y el sievert-persona. Una y otra se obtienen a través de un producto matemático: se multiplica la dosis media por persona por el número de individuos expuestos; por ejemplo, si en un colectivo de 100 personas recibe un rem cada una, diremos que la radiación inducida es de 100 rem-persona o un sievert-persona.

El trasfondo ambiental radiactivo que existe en la naturaleza está constituido principalmente por (1) rayos cósmicos, (2) emisiones procedentes de las desintegraciones de uranio, torio, radio y demás elementos radiactivos de la corteza terrestre y (3) emisiones de potasio 40, carbono 14 y otros isótopos radiactivos que se encuentran en el organismo. La dosis promedio colectiva, procedente de estas tres fuentes y recibida por los órganos internos de un individuo que viva en un lugar a nivel del mar, se cifra en torno a los 0,8 milisievert (80 milirem) por año. Quienes habiten en zonas de mayor altitud, donde la radiación cósmica es más intensa, o en regiones donde el contenido en radio es algo superior, podrían recibir una dosis doble.

La fracción radiactiva más importante de entre las que hemos llamado fuentes artificiales o creadas por el hombre es la constituida por el diagnóstico médico, cuyo valor se aproxima al causado por el trasfondo natural. (Las proporciones en que habría que desglosar los distintos tipos de exámenes médicos y odontológicos varían ampliamente.) Otras fuentes que llevan el marchamo de la manipulación humana son los minerales radiactivos presentes de forma natural en ciertos tipos de piedra prensada, materiales de construcción y abonos fosfatados; también, componentes radioemisores de los aparatos de televisión, detectores de humos y otros productos de consumo; y, por supuesto, lluvia radiactiva de explosiones nucleares y escapes de centrales nucleares.

Los rayos X se utilizaron en el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades a los pocos meses de que los descubriera, en 1895, W. K. Röntgen. Tampoco se tardó mucho en observar los efectos colaterales de tipo mórbido que ocasionaban. Comenzaron a manifestarse, horas o días después de la exposición, lesiones transitorias como enrojecimientos y vesículas en la piel. Antes de 1902 se sabía ya que un efecto a lar-

go plazo de la radiación podía ser el desarrollo de un tumor. El primer caso de cáncer reconocido apareció en la zona de una lesión epitelial de larga duración de la mano de un radiólogo. En las décadas subsiguientes, y antes de que se adoptaran las medidas de seguridad correspondientes, se repitieron tumores semejantes entre los pioneros del campo de la radiación. Iban precedidas esas afecciones, de una manera típica, por una larga historia de lesión epitelial inducida por radiación, por cuyo motivo se supuso que la radiación provocaba el cáncer tan sólo en el caso de que la dosis fuera lo suficientemente elevada para causar lesiones graves. Se manejaba, pues, en ese razonamiento cierta forma del concepto de umbral.

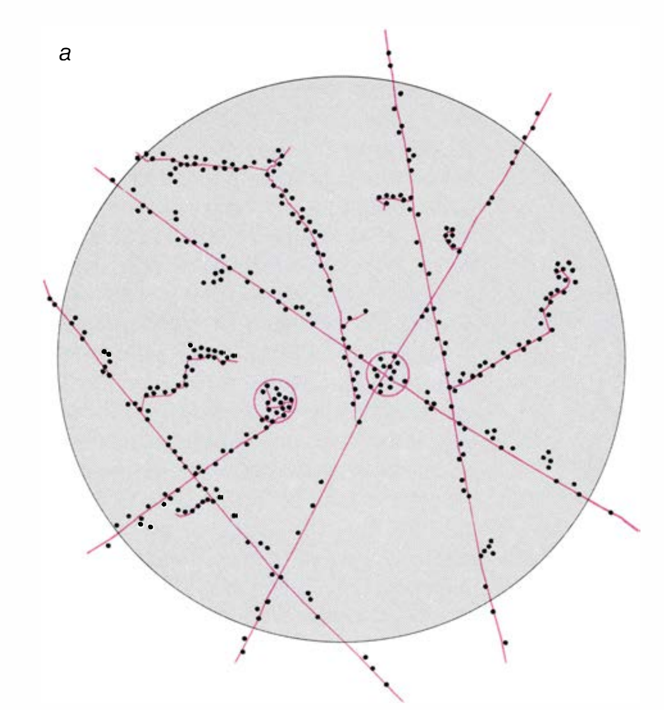
Pero la posibilidad de que los tumores resultaran de dosis leves de radiación no se abordó de una manera seria hasta la década de 1950, cuando E. B. Lewis, del Instituto de Tecnología de California, dedujo que la incidencia de dicho mal podría crecer con arreglo a una función lineal dependiente de la dosis, sin umbral. (Basaba su conclusión en la alta frecuencia de leucemias que se registraba entre los supervivientes de los bombardeos atómicos del Japón, entre los radiólogos y entre determinados grupos de pacientes tratados con rayos X en procesos no cancerosos.) Semejante relación dosis-efecto parecía concordar con la hipótesis de que la leucemia resultara de una mutación inducida por radiación en una célula eritropoyética. Siguiendo en esa línea de razonamiento, Lewis postulaba que del 10 a un 20 por ciento de todos los casos de leucemia podrían atribuirse a la radiación natural de fondo.

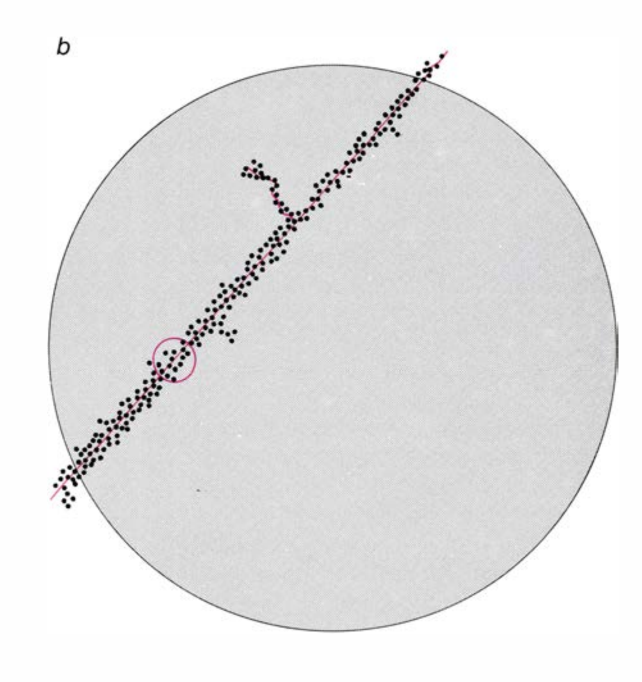
La explicación de Lewis, donde se suponía que todas las dosis de radiación presentaban riesgo cancerígeno, provocó la consiguiente preocupación y abrió una disputa no cerrada todavía. Aunque nadie defienda ya la existencia de un umbral cuyo traspaso engendra tumores, a la hora de poner límite a la exposición a una radiación ionizante, continúa desconociéndose el alcance del riesgo asignable a la radiación de bajo nivel.

Desde hace tiempo se viene sosteniendo que los efectos que las radiaciones ionizantes causan en el genoma (y se transmiten por tanto a los descendientes) carecen de valor umbral y constituyen, por ende, un peligro connatural con la radiación de bajo nivel. Por otro lado hay documentación clínica de efectos no hereditarios producidos sólo a partir de unos niveles altos; éstos, por tanto, sí que parecen presentar un umbral. Se encuadran en esta categoría la opacificación del cristalino, la disminución de la fertilidad y la depleción de los glóbulos blancos de la sangre. Todo indica, asimismo, que los trastornos inducidos por la radiación en el desarrollo embrionario resultan de dosis lo suficientemente elevadas para destruir muchas células de los tejidos afectados, de lo que se desprende la inverosimilitud de que vengan producidas por una exposición a los bajos niveles del fondo radiactivo natural.

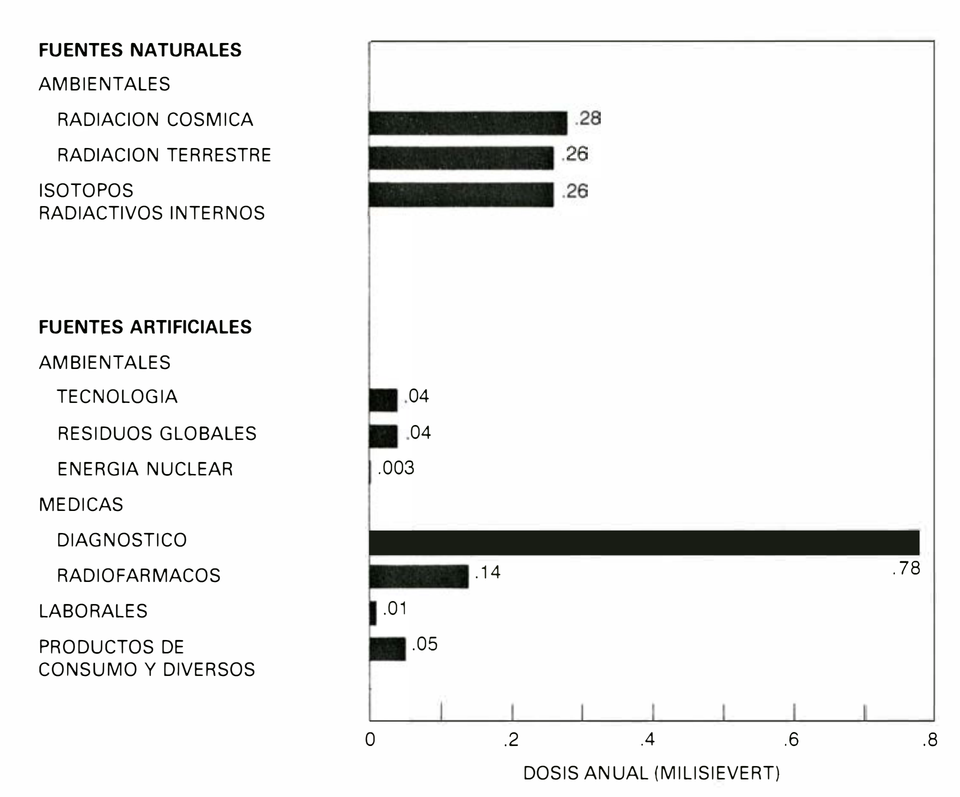
Así pues, los efectos cancerígenos y los trastornos hereditarios constituyen los dos peligros principales que corre la salud en relación con las bajas dosis de radiación. Para determinar qué riesgos comporta la radiación a bajo nivel, habremos de analizar la naturaleza de esos efectos y su relación con la exposición de un sujeto a dicha acción. El examen exige, por su parte, una consideración más pormenorizada de las interacciones entre la radiación ionizante y la célula viva.

A medida que va penetrando en el tejido, la radiación ionizante libera su energía a través de una serie de colisiones e interacciones aleatorias con los átomos y moléculas que le salen al paso. Colisiones e interacciones que dan lugar a la aparición de iones y de radicales químicos reactivos; éstos rompen enlaces químicos y causan otras alteraciones en las moléculas vecinas. La distribución de las ionizaciones a lo largo del trayecto del rayo o la partícula depende de la energía, masa y carga eléctrica de la radiación y, en menor grado, de la densidad del tejido absorbente. De forma general, los rayos X y gamma (que son eléctricamente neutros) se caracterizan por un bajo gradiente de

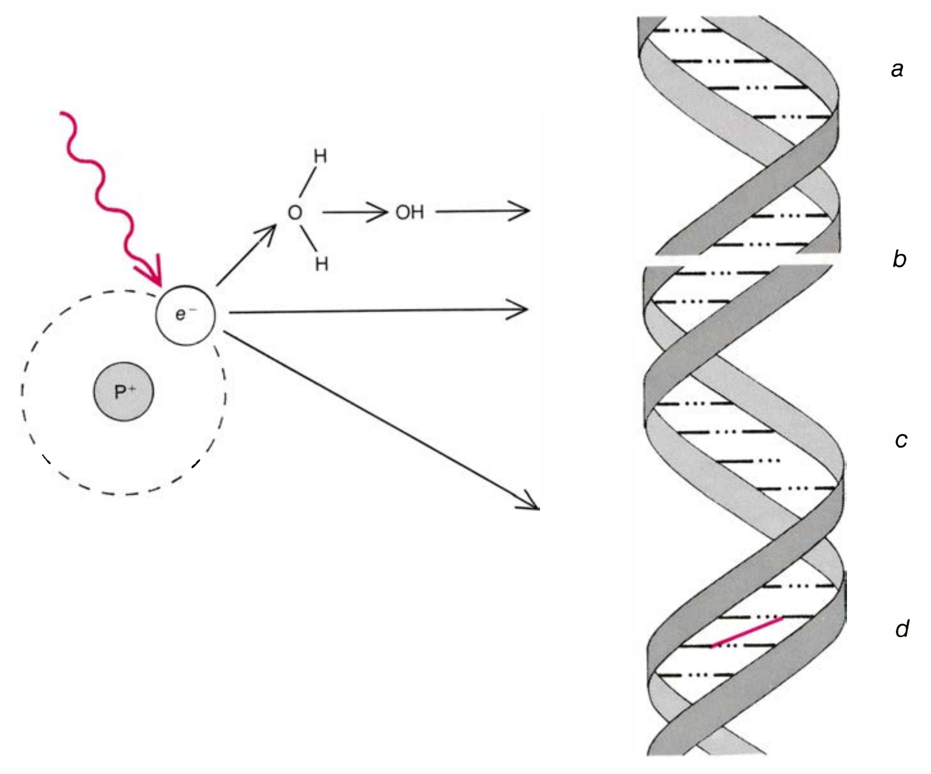



**ENERGIA DE LA RADIACION que incide sobre una célula viva. Se disipa de manera distinta según sea la naturaleza de dicha radiación. Los rayos X y los rayos gamma tienen, por lo general, una baja transferencia lineal de energía: aunque penetran profundamente, generan escasos iones a lo largo de su trayecto. La radiación de partículas, así electrones y partículas alfa, tienen una alta transferencia lineal de energía. En la ilustración aparecen los dos tipos, para dosis iguales de radiación gamma (*a*) y radiación de partículas (*b*). Los puntos representan las ionizaciones causadas por la pérdida energética a lo largo de la trayectoria seguida por la radiación (*líneas de color*). Se producen altas concentraciones de disipación de energía en pequeños volúmenes en ambos casos (*circunferencias de color*); por unidad de dosis son menos frecuentes en *a* que en *b*. La figura se basa en el trabajo de G. W. Barendsen.**




**EXPOSICION A LA RADIACION**, procedente de fuentes naturales y artificiales, del ciudadano norteamericano medio. La unidad utilizada en la representación es el milisievert. Se llama sievert a la cantidad de cualquier radiación cuyo efecto biológico equivale a 100 rad (un rad son 100 erg por gramo de tejido) de radiación gamma. La dosis promedio total por año es de 0,8 milisievert de fuentes naturales y 1,06 milisievert de fuentes producidas por el hombre. Una radiografía dentaria normal arroja, aproximadamente, un milisievert a la parte central de la mejilla. El efecto de las radiaciones parece ser aditivo.



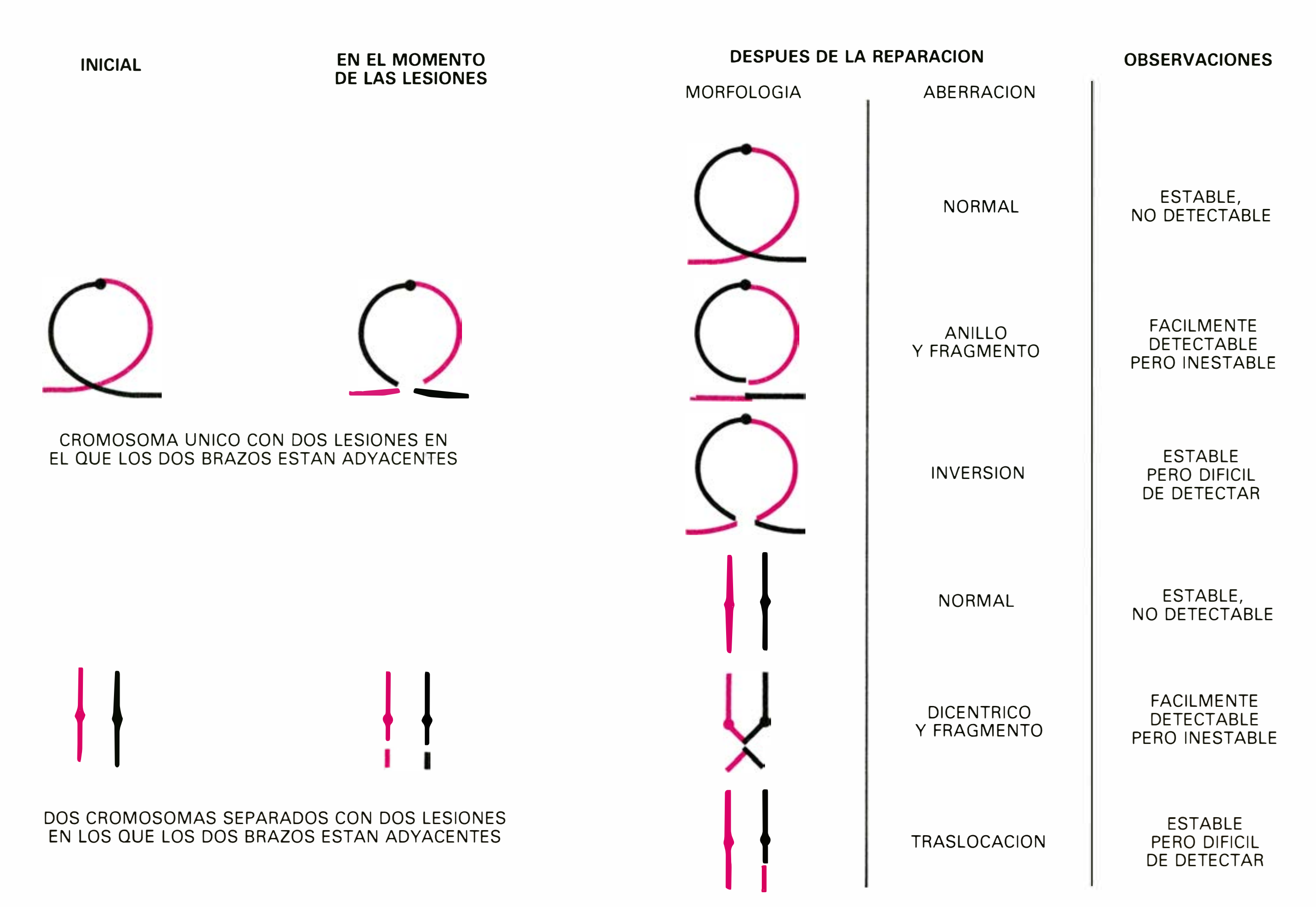

**LESION INDUCIDA EN EL ADN.** Se trata del efecto causado por la radiación a bajo nivel que reviste mayor trascendencia. El efecto puede ser directo o indirecto. A la izquierda, un átomo de hidrógeno, constituido por un protón y un electrón, se ioniza. (El electrón salta de su órbita cuando el átomo absorbe un fotón de radiación.) En el efecto indirecto (*flecha superior*), un electrón secundario interacciona con una molécula de agua ($H_2O$) y da lugar a un radical libre (OH) que provoca la lesión del ADN. En el efecto directo (*flechas inferiores*) el electrón mismo interacciona con el ADN. La representación esquemática del ADN muestra un segmento normal de la molécula (*a*) y tres de los muchos tipos de lesión que pueden derivar de los efectos directos o indirectos de la ionización: una ruptura de la doble cadena en la doble hélice del ADN (*b*), la deleción de una base (*c*) y el enlace químico cruzado de las dos cadenas (*d*).

transferencia lineal de energía. ¿Qué quiere ello decir? Que generan escasos iones a lo largo de su trayecto y penetran hondamente en los tejidos. Las partículas dotadas de carga se caracterizan por una transferencia lineal más elevada y menor adentramiento. La capacidad de lesionar está relacionada con la densidad de liberación de energía. Las radiaciones con alta transferencia lineal de energía (así protones y partículas alfa) producen, en general, un daño mayor que las radiaciones de baja transferencia lineal de energía (rayos X y rayos gamma, por ejemplo).

La lesión celular constituye el resultado de los cambios moleculares causados por los iones y los radicales libres inducidos por la radiación. De entre todas las moléculas afectadas por la radiación ionizante, la del ADN es la más importante, habida cuenta del número reducido de copias de la información genética en ella inscrita. La cantidad total de energía depositada por una dosis letal de rayos X que afecte al organismo entero (que se cifra en torno a los tres o cinco sievert) produce centenares de rupturas en las moléculas de ADN de todas las células que integran el organismo.

El daño infligido en el ADN por la trayectoria de una radiación con baja transferencia lineal de energía consiste, con bastante seguridad, en lesiones simples: ruptura de una de las dos cadenas que configuran la doble hélice de ADN, por ejemplo. Daños más severos son propios, cabe presumirlo, de una radiación de alta transferencia lineal de energía. Si tenemos presente que las lesiones simples se reparan, en la mayoría de los casos, por enzimas celulares, la cuantía final de la alteración dependerá, en última instancia, de la eficacia del proceso reparador y de la naturaleza de la lesión inicial. Los efectos de una lesión no reparada, o mal reparada, en una molécula de ADN pueden multiplicarse (amplificarse se dice también) muchas veces a lo largo de la transcripción y traducción del ADN; proceso que podría desembocar en la transmisión de la anomalía a innumerables células hijas. Aunque sólo fuera por ello, la agresión sufrida por cromosomas y genes merece una atención mayor que cualquier otra lesión inducida por irradiación a bajos niveles.

Las alteraciones cromosómicas constituyen uno de los efectos de la radiación más estudiados. En esa expresión genérica se engloban cambios en el número y estructura de los cromosomas, resultantes de la ruptura y reagrupación de los brazos de los cromosomas, así como de la interferencia u obstruc-




**AUNQUE LAS LESIONES CROMOSOMICAS causadas por la radiación suele repararlas el propio organismo, no siempre se hace bien; de ahí que surjan aberraciones y anomalías cromosómicas. Se representa aquí esta situación para un solo cromosoma (*arriba*), con una lesión inducida por la radiación en cada brazo, y para dos cromosomas distintos (*abajo*), portador uno de una lesión en un brazo. Si las dos rupturas no se encuentran muy próximas ni en el espacio ni en el tiempo, el mecanismo de reparación retorna el cromosoma a su condición normal. Si están próximas en el espacio y el tiempo, pueden producirse anomalías, debidas a varios tipos de reparación incorrecta. La ilustración se basa en el trabajo de Malcolm L. Randolph y J. G. Brewen.**

ción de la separación normal de los cromosomas durante la división celular.

A través de los procesos de reparación metabólica llegan a unirse los fragmentos del cromosoma roto. Cuando hay dos rupturas muy cercanas en el espacio y en el tiempo, los extremos de un fragmento pueden unirse incorrectamente a los de otro, y originar así translocaciones, inversiones, formas anulares y otras configuraciones de reagrupamiento estructural. La frecuencia de esas aberraciones cromosómicas crece con arreglo a una función lineal, sin umbral, de la dosis en el rango bajo-medio. Si representamos gráficamente el número de lesiones cromosómicas, la pendiente de la función se acentúa para radiaciones con alta transferencia lineal de energía, comparada con la correspondiente para las de baja transferencia lineal. Al aumentar la dosis y la tasa de ésta, sube la pendiente para radiaciones con baja transferencia, pero permanece sin modificación sustancial para radiaciones de baja transferencia.

¿Qué deducir de esa relación dosis-efecto? La existencia de una baja probabilidad de que aparezca una aberración cromosómica debida a radiaciones de transferencia asimismo baja, salvo que dos o más trayectorias de radiación atraviesen una zona determinada del núcleo celular en una sucesión cuya rapidez determine que las lesiones producidas en una trayectoria interaccionen con las de la otra. Y, por contra, que las lesiones resultantes de un solo trayecto de radiación de alta transferencia tienen gran probabilidad de interacción entre sí, con independencia de las lesiones que correspondieran a la trayectoria de otra radiación.

La frecuencia de alteraciones cromosómicas en los linfocitos (una clase de glóbulos blancos) extraídos de la sangre circulante y mantenidos en un medio de cultivo aparece incrementada, de forma significativa, en individuos que trabajan en el sector de la radiación o se hallan expuestos a ella. La frecuencia combinada de tales aberraciones registradas inmediatamente después de la irradiación in vitro ronda el 0,1 por célula por sievert, de donde se pone de manifiesto que la dosis requerida para duplicar su frecuencia puede cifrarse en torno a 0,05 sievert, unas 60 veces la dosis anual que recibimos normalmente por radiación natural de fondo. También eleva la frecuencia de esas aberraciones la acción de virus, productos químicos y drogas. Al bloquear la división de las células afectadas, la mayoría de tales aberraciones se muestran inestables. En efecto, las células pierden su capacidad replicativa y terminan por desaparecer.

Desde que H. J. Muller la descubriera en 1927, la acción mutágena de la radiación sobre los genes ha sido objeto de extensa investigación en múltiples especies. Aunque no poseamos pruebas demostrativas de efectos hereditarios inducidos por radiación en la población humana, el alud de datos valiosos referentes a otros organismos suministra una base donde asentar nuestra predicción de lo que pueda ocurrir en el hombre. La fuente más adecuada es la que tenemos en los experimentos realizados con ratones.

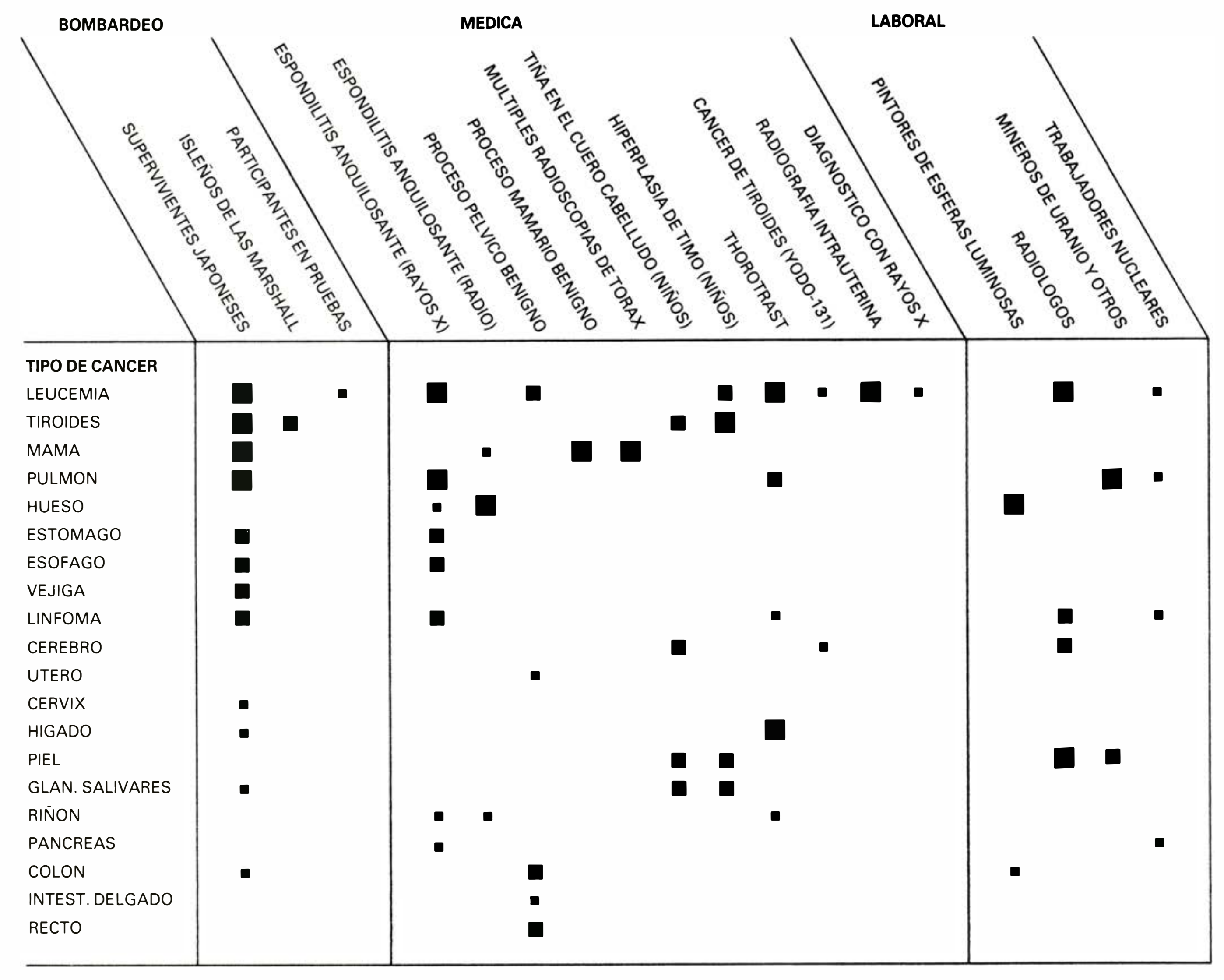
De tales ensayos se infiere que la relación dosis-efecto en la inducción de mutaciones en espermatogonias y ovocitos (espermatozoides y óvulos en ma-

duración) es muy similar a la de las aberraciones cromosómicas. Con radiación de alta transferencia, la tasa de mutaciones crece, de un modo muy pronunciado, con arreglo a la dosis, pero se muestra bastante independiente con respecto al ritmo de la dosis. (Entendemos aquí por dosis la cantidad total de energía radiante depositada en un tejido o célula, sin considerar el tiempo; por ritmo de dosis, la cantidad de energía radiante en una unidad de tiempo.) Con la radiación de baja transferencia, la frecuencia de mutaciones no aumenta tan drásticamente en función de la dosis, pero se muestra muy ligada al ritmo de dosis.

A la hora de abordar estos temas, la atención se dirige hacia los efectos genéticos producidos por las exploraciones nucleares y por la radiación natural de fondo. No se ha detectado ningún aumento apreciable en el número de las anomalías genéticas en los descendientes de quienes sobrevivieron a los dos bombardeos atómicos. Ello no es incompatible con la tasa de inducción observada en los ratones, toda vez que el tamaño de la muestra era muy pequeño (78.000 niños) y, baja, la dosis media recibida por las gónadas de los padres (0,5 sievert).

De acuerdo con el estado actual de la información conseguida, parece que la dosis necesaria para duplicar la tasa de mutaciones en humanos oscila entre 0,2 y 2,5 sievert. A partir de esos valores se ha avanzado cuál sería la porción asignable al fondo natural radiactivo en la frecuencia de los distintos tipos de enfermedades hereditarias de la población. Se trata de cálculos bastante dudosos, pues no es fácil relacionar el número de enfermedades genéticas de la población considerando nada más que la tasa de mutación; ello no obstante, se supone que es sólo mínima la cantidad de todas las enfermedades hereditarias que pueden atribuirse a la radiación de fondo: del 0,1 al 2 por ciento.

La radiación incrementa la frecuencia de muchos tipos de tumores, aunque no la de todos. Aumento que tiene que ver con las condiciones de exposición y con factores que inciden en la sensibilidad de la población sujeta a esa acción. Lo difícil del caso es que los tumores inducidos por radiación no presentan unos rasgos definitorios que los caractericen como tales. Peor todavía: no suelen manifestarse hasta pasados años o décadas de la irradiación. Por consiguiente, la relación entre cáncer y una irradiación anterior sólo puede demostrarse a partir de datos epidemiológicos claros. Tres son las principales fuentes de esta información: los estudios realizados sobre supervivientes de los bombardeos atómicos, sobre enfermos expuestos a radiación en el diag-



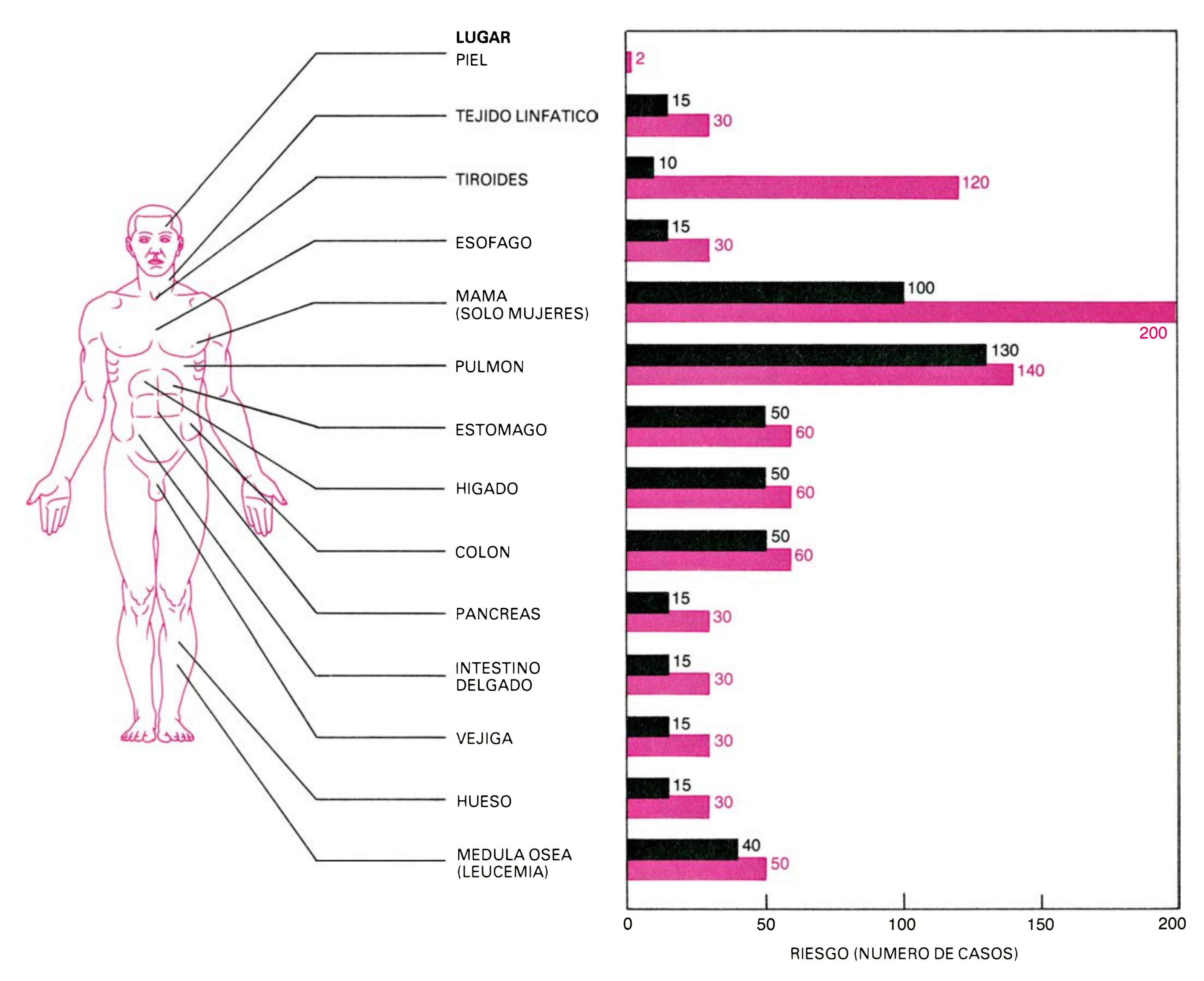

**INCIDENCIA DE CANCER** asociada con radiación. Se muestra tabulada para personas expuestas a la radiación en tres situaciones diferentes: los bombardeos atómicos del Japón, radioterapia, para el tratamiento o diagnóstico de otras enfermedades, y exposición laboral. La asociación fuerte entre ciertos tipos de cáncer y cierto tipo de exposición se representa con cuadrados grandes; la asociación significativa, por medianos y, una asociación probable, pero sin confirmar, por cuadrados pequeños. Los tres grupos presentan una exposición a la radiación bastante bien documentada en todos ellos.

nóstico y tratamiento médico y sobre quienes trabajan en un medio sometido a la acción radiactiva.

Puesto que la frecuencia relativa de los distintos tipos de tumores es relativamente baja, el análisis de la relación matemática entre dosis e incidencia requiere estudiar poblaciones bastante numerosas. Si tenemos en cuenta, además de la cifra elevada de individuos, el dilatado lapso de tiempo transcurrido entre la irradiación y la manifestación del cáncer, entenderemos por qué esos estudios adquieren una complejidad característica con la introducción de incertidumbres sobre la magnitud de la dosis de radiación recibida por los afectados y la influencia posible de riesgos de otra índole. Lo que no obsta, sin embargo, para que distintas poblaciones irradiadas muestren una notable regularidad en lo concerniente a la relación entre la magnitud de la tasa de aparición de cáncer y la dosis de radiación calculada. Es de destacar que los datos se refieren a dosis de radiación bastante altas (de 0,5 sievert a 2 sievert); quiere ello decir que habrá que calcular los riesgos cancerígenos implicados en la radiación a bajo nivel extrapolando a partir de suposiciones aproximadas de la relación dosis-incidencia.

La información de que disponemos sobre esa relación en el caso de la leucemia y el cáncer de mama supera a la recabada para cualquier otro tipo de tumor. Se han estudiado varias poblaciones y un rango muy amplio de dosis. En todas las clases de leucemia, salvo la linfoide crónica, la incidencia aumenta con la dosis. Durante los 25 años inmediatos a la irradiación, el incremento total acumulativo de todos los tipos contabiliza un caso por 10.000 individuos en peligro por sievert de radiación en la médula ósea.

Vale la pena resaltar la regularidad de las cifras, de un grupo a otro, para el cáncer de mama, dadas las diferencias registradas en cuanto a la duración de la exposición entre poblaciones. Los individuos expuestos a las explosiones nucleares sufrieron una irradiación prácticamente instantánea; las mujeres que seguían un tratamiento radioterapéutico sufrieron de una a cuatro exposiciones en días sucesivos; por fin, las mujeres que se sometieron a repetidos exámenes radioscópicos del tórax, durante tratamiento de tuberculosis pulmonar, recibieron una dosis acumulada de varios meses (con incrementos de 0,01 a 0,05 sievert). (El tratamiento implicaba colapsar un pulmón; los exámenes mediante fluoroscopía se realizaban para asegurarse de que el órgano no se había vuelto a expandir.) El hecho de que el incremento de episodios cancerosos por unidad de dosis no sea significativamente inferior en el tercer grupo pone de manifiesto que las exposiciones sucesivas, pequeñas y bastante




**RIESGO DE APARICION, a lo largo de la vida, de varios tipos de cáncer por exposición a radiación a bajo nivel. Los datos se apoyan en estimaciones de numerosos investigadores. El riesgo corresponde a una exposición de 10.000 sievert-persona, esto es, a un sievert de radiación a cada una de las 10.000 personas a lo largo de su vida. Las cifras dadas son las estimaciones máximas de tumores con desenlace fatal (*negro*) y el número de casos de cáncer (*color*). Las estimaciones cubren un rango en el que la cifra mínima es mucho más baja (por ejemplo, 15 casos y 15 defunciones en neoplasia de médula ósea).**

espaciadas, se muestran totalmente aditivas en su efecto acumulativo sobre el tejido de la mama. La ausencia de una reparación detectable en esas exposiciones menores y espaciadas se ajusta a una relación lineal, sin umbral, entre la dosis y la incidencia.

Se han cosechado más pruebas de los efectos cancerígenos que inducen las dosis bajas en las investigaciones sobre cáncer tiroideo subsiguiente a un proceso radioterapéutico; efectos que se han visto también a raíz del estudio de la asociación entre irradiación prenatal y carcinomas en la infancia. En varios trabajos se ha registrado un incremento de la incidencia de tumores tiroideos después de un tratamiento de cabeza y cuello con rayos X en la infancia. Dos de esos estudios revelan que el incremento de tumores era evidente con dosis en el tiroides muy bajas, del orden de 0,06 o 0,2 sievert.

Tal vez no medie ninguna relación causal en la asociación entre irradiación prenatal y cáncer en la infancia, pero quedan por demostrar cuáles sean esos otros motivos. Mirando lisa y llanamente los datos, se aprecia que el diagnóstico en el que se emplea rayos X puede aumentar el riesgo de cáncer antes de la pubertad hasta en un 50 por ciento. Si pensamos, además, que las dosis promedio de tales circunstancias oscilan en torno los 0,01 y 0,05 sievert, estaremos de acuerdo en que el aumento de la cifra de tumores apunta hacia la existencia de una destacada sensibilidad del embrión y el feto a los efectos carcinogénicos de la irradiación.

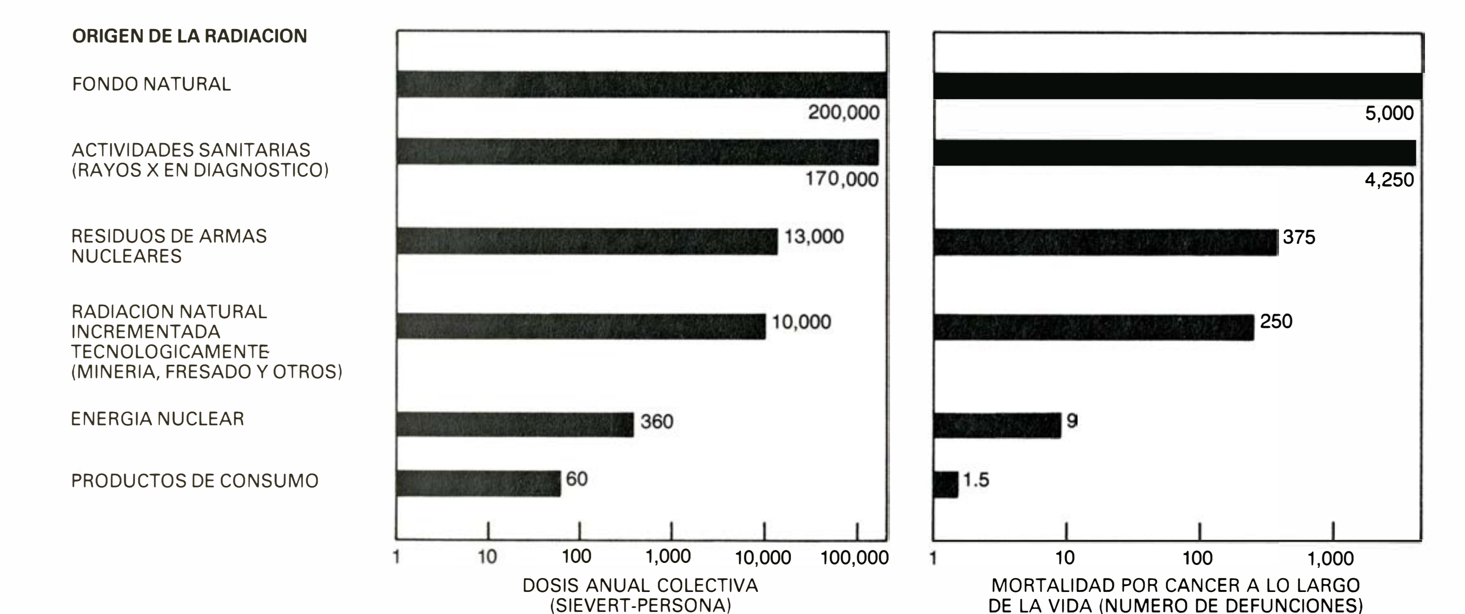
Se ha comprobado que otros muchos tipos de cáncer aumentan su frecuencia entre poblaciones irradiadas, pero los datos recogidos sobre la relación dosis-incidencia de tales tumores suelen ser limitados. Lo que no impide que revelen que los efectos cancerígenos de determinada dosis sean, de ordinario, mayores con radiación de alta transferencia que con baja. Nos señalan también los datos que el incremento de episodios por unidad de dosis varía, de forma apreciable, entre carcinomas de distintos puntos del organismo.

El análisis de los datos disponibles, realizado por grupos interesados en los efectos biológicos de la radiación ionizante que trabajan para las Naciones Unidas y la Academia Nacional de Ciencias estadounidense, ha llegado al siguiente resultado: el incremento absoluto de todos los tipos de tumores es de cuatro a 18 (de dos a 10 con desenlace fatal) por año por 10.000 personas con riesgo por sievert, a partir de los dos y diez años subsiguientes a la irradiación de todo el organismo y manteniéndose posteriormente a lo largo de la vida de la población expuesta. Las cifras corresponden a un incremento acumulativo durante toda la vida de 140 a 1000 tumores (de 70 a 500 con desenlace fatal) por 10.000 personas con riesgo por sievert.

Se han criticado esos cálculos argumentando que el riesgo real puede muy bien multiplicar por diez el número señalado, ya que, según parece, no se tomaron en cuenta determinados estudios sobre poblaciones expuestas a radiación con dosis bajas en las que se había registrado más cantidad de tumores que los incluidos en las previsiones estimativas. En estos estudios se examinaron trabajadores de la central nuclear de Hanford, en el estado de Washington, trabajadores del sector nuclear de la base naval de Portsmouth, en el estado de New Hampshire, personal militar expuesto al radio de acción de las pruebas de armas nucleares en Nevada, niños que vivían en la trayectoria del viento procedente de una zona de pruebas nucleares en el estado de Utah y, por fin, pacientes sometidos a radiaciones de rayos X en el proceso de diagnóstico clínico.

Bástenos con afirmar que ninguno de los trabajos consigue una correlación convincente de los tumores en cuestión con la cantidad de radiación verosímil, ni incorpora debidamente la posible influencia de la exposición al humo de cigarrillos, fármacos, productos químicos y otros factores de potencial ocurrencia. En opinión de la mayoría de los expertos, los trabajos no presentan, pues, argumentos que recomienden modificar a la alta las actuales estimaciones de riesgo por radiación. Todavía más. Son muchos los expertos que sostienen que los cálculos actuales exageran el riesgo, por no prestar atención suficiente a la reparación de la lesión a bajas dosis y a bajas intensidades (o ritmos), observada en tumores inducidos en animales de experimentación.

Cuando se trata de radiación de baja transferencia lineal, hay fundamento radiobiológico que permite suponer que el riesgo por unidad de dosis disminuye a medida que decae la dosis y su ritmo. En este caso, pues, la extrapolación que se apoya en un modelo lineal, sin umbral, protendería a sobreestimar




**CONTRIBUCION de distintas fuentes de radiación al conjunto de cánceres de desenlace fatal en la población estadounidense. Se muestra tabulada en base a numerosas estimaciones. La dosis anual de cada fuente de radiación se expresa en sievert-persona. El número total de cánceres letales es inferior a 10.000 por año, alrededor del 2,5 por ciento de la mortalidad anual debida a los tumores producidos por cualquier causa conocida o desconocida.**

| SITUACION | CAUSA DE LA MUERTE |
|---|---|
| VIAJAR 1100 KM POR VIA AEREA | ACCIDENTE |
| CRUZAR EL OCEANO POR EL AIRE | CANCER POR RADIACION COSMICA |
| VIAJAR 95 KM EN AUTOMOVIL | ACCIDENTE |
| ESTAR DE VISITA DOS MESES EN DENVER | CANCER POR RADIACION COSMICA |
| VIVIR DOS MESES EN UN EDIFICIO DE PIEDRA | CANCER POR RADIACTIVIDAD |
| TRABAJAR SEMANA Y MEDIA EN UNA FABRICA NORMAL | ACCIDENTE |
| TRABAJAR TRES HORAS EN UNA MINA DE CARBON | ACCIDENTE |
| FUMAR DE UNO A TRES CIGARRILLOS | CANCER, ENFER. CARDIO-PULMONAR |
| HACER MONTAÑISMO DURANTE 1,5 MINUTOS | ACCIDENTE |
| VIVIR 20 MINUTOS A LA EDAD DE 60 AÑOS | MUERTE POR CUALQUIER CAUSA |

**RIESGO DE LA EXPOSICION a radiación, comparado con el riesgo que comportan otras situaciones o actividades. En cada caso, el riesgo es la probabilidad de una muerte en un millón a causa de la exposición. La ilustración se funda en el trabajo de E. E. Pochin, en Inglaterra, y R. Wilson, de Harvard.**

el riesgo de la exposición a bajos niveles de dicha irradiación; habría que aplicar, consiguientemente, estimaciones menores. Cuando nos hallamos con la radiación de alta transferencia lineal de energía, los datos señalan la verdad contraria: el efecto carcinogénico de este tipo de radiación crece, al parecer, conforme reducimos la dosis y su ritmo.

Mientras no dispongamos de un conocimiento más exacto de los mecanismos que explican las distintas formas de cáncer inducido por radiación, cualquier modelo hipotético que se idee respecto a la relación dosis-incidencia pecará, a buen seguro, de burda simplificación. En lo concerniente a las dosis situadas en el rango de medias y altas, la investigación con animales de laboratorio manifiesta que tales dosis pueden intervenir en el riesgo de tumores distintos a través de efectos diversos sobre la regulación endocrina, inmunidad, renovación celular y otras funciones fisiológicas, mostrando una relación dosis-incidencia que varía coherentemente. La prueba de que esa relación podría variar de forma similar en los tumores humanos nos la suministran los datos recogidos sobre tumores óseos, leucemia y cáncer de mama. La representación gráfica de la incidencia ofrece curvas similares para el caso de leucemia y cáncer de mama, pero otra totalmente distinta para los tumores óseos.

Puesto que el número de cánceres atribuibles a bajos niveles de radiación en adultos es pequeño en comparación con el número atribuible a otras causas, cualquier trabajo de indagación epidemiológica que se proponga verificar la estimación de riesgo para dosis entre uno y 50 milisievert tendría que abarcar cientos de personas. Por tanto, los esfuerzos que se destinaran en el futuro a depurar las estimaciones sobre el riesgo humano no deberían basarse en meras observaciones empíricas, sino que tendrían que implicar la investigación sobre los mecanismos de los efectos carcinogénicos en animales de laboratorio, cultivos celulares y otros sistemas experimentales.

A partir de las actuales estimaciones de riesgo, y con la premisa de que éste varía con arreglo a una función lineal sin umbral de la dosis hasta los niveles de la radiación natural de fondo, se puede deducir que sólo una pequeña parte de todos los tumores (del 1 al 3 por ciento) de la población general son atribuibles a la radiación natural de fondo. Esta deducción está en consonancia con las comparaciones empíricas de las cifras de cáncer en áreas geográficas que reciben distintos niveles de radiación de fondo. Suponen asimismo los cálculos que una proporción apreciable de los cánceres de pulmón en no fumadores obedece a la inhalación de isótopos radiactivos existentes de forma natural en el aire.

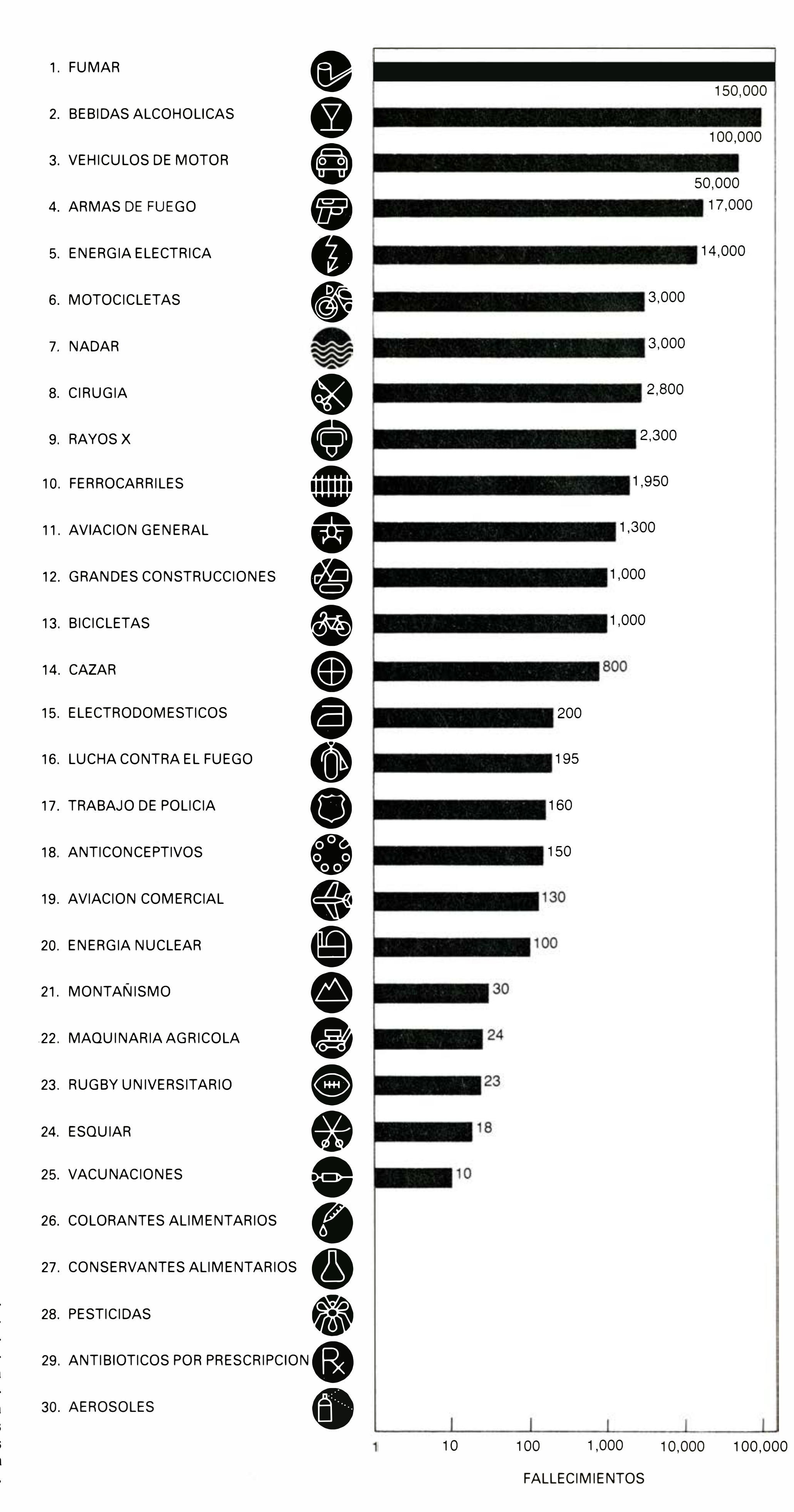
El número de cánceres atribuibles a irradiación en el lugar de trabajo representa, en la mayoría de los grupos de los afectados, un incremento inferior al 1 por ciento sobre la incidencia natural. Por tanto, el promedio de riesgo de los trabajadores con radiación expresado en términos de supervivencia, combinando efectos carcinogénicos y hereditarios, es comparable con el riesgo de las profesiones consideradas seguras.

De acuerdo con el postulado de que toda cantidad de radiación produce algún efecto, debe considerarse la existencia de riesgo asociado con cualquier

actividad que conlleve irradiación a bajo nivel, sin importar cuán baja sea la dosis. Dichos riesgos parecen insignificantes comparados con otros peligros de la vida cotidiana [*véase la ilustración de la página anterior*]. Ningún riesgo puede reputarse aceptable si lo podemos evitar o si no se acompaña de un beneficio evidente. En general, la asunción de un riesgo forzado no se acepta en la medida en que es impuesto, sobre todo si afecta a quienes no comparten por igual sus beneficios relativos. La ponderación de los riesgos y de los beneficios debe evaluarse de forma personal, puesto que varía considerablemente de un individuo a otro.

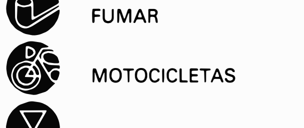
La estimación de los peligros para la salud de la radiación de bajo nivel constituye, ciertamente, un problema científico; pues la aceptación de tales peligros depende de la magnitud, supuesta y real, de los riesgos y beneficios asociados. Por tanto, en el proceso para decidir la aceptabilidad de los peligros de la radiación debe estar representada toda la sociedad. Las decisiones de una política acertada dependerán del conocimiento y la comprensión pública de los hechos, así como de los datos que proporcione la ciencia.

Merece la pena advertir, además, que los problemas planteados por la radiación a bajo nivel, a la hora de evaluar su riesgo, son paralelos a los que surgen al evaluar los riesgos a la exposición a bajo niveles de sustancias químicas tóxicas. Este último problema es aún más complicado: no sólo se enfrenta con variaciones mal definidas entre los individuos y especies en la ingesta, distribución, metabolismo, desintoxicación y excreción de las sustancias, sino que debe abordar también otras fuentes de incertidumbre. Las bases científicas para fijar los riesgos de la radiación y de los productos químicos guardan un cercano parecido en su noción y principios, derivados de los esfuerzos emprendidos para comprender y protegernos contra los efectos biológicos de la radiación; pueden sernos útiles, pues, en el desarrollo de estrategias de protección frente a la agresión que suponen los productos químicos tóxicos y otros agentes ambientales potencialmente nocivos para la salud.



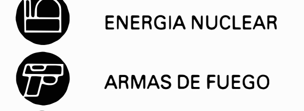

**VALORACION DEL RIESGO. Varía notablemente entre diferentes grupos de personas. Se representa una encuesta en la que «Decission Research» pidió a miembros de tres grupos que valoraran las 30 causas de riesgo listadas en la primera columna. Las causas se han ordenado en esa columna con arreglo a su verdadera contribución anual al número de fallecimientos en los Estados Unidos. En la segunda columna se muestran las respectivas contribuciones: las restantes recogen las valoraciones efectuadas por los tres grupos.**

**ASOCIACION DE MUJERES VOTANTES**



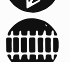
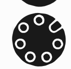
ENERGIA NUCLEAR
VEHICULOS DE MOTOR
ARMAS DE FUEGO
FUMAR
MOTOCICLETAS
BEBIDAS ALCOHOLICAS
AVIACION GENERAL
TRABAJO DE POLICIA
PESTICIDAS
CIRUGIA
LUCHA CONTRA EL FUEGO
GRANDES CONSTRUCCIONES
CAZAR
AEROSOLES
MONTAÑISMO
BICICLETAS
AVIACION COMERCIAL
ENERGIA ELECTRICA
NADAR
ANTICONCEPTIVOS
ESQUIAR
RAYOS X
RUGBY UNIVERSITARIO
FERROCARRILES
CONSERVANTES ALIMENTARIOS
COLORANTES ALIMENTARIOS
MAQUINARIA AGRICOLA
ANTIBIOTICOS POR PRESCRIPCION
ELECTRODOMESTICOS
VACUNACIONES

**UNIVERSITARIOS**



ENERGIA NUCLEAR
ARMAS DE FUEGO
FUMAR
PESTICIDAS
VEHICULOS DE MOTOR
MOTOCICLETAS
BEBIDAS ALCOHOLICAS
TRABAJO DE POLICIA
ANTICONCEPTIVOS
LUCHA CONTRA EL FUEGO
CIRUGIA
CONSERVANTES ALIMENTARIOS
AEROSOLES
GRANDES CONSTRUCCIONES
AVIACION GENERAL
AVIACION COMERCIAL
RAYOS X
CAZAR
ENERGIA ELECTRICA
COLORANTES ALIMENTARIOS
ANTIBIOTICOS POR PRESCRIPCION
MONTAÑISMO
FERROCARRILES
BICICLETAS
ESQUIAR
RUGBY UNIVERSITARIO
ELECTRODOMESTICOS
MAQUINARIA AGRICOLA
VACUNACIONES
NADAR

**MIEMBROS DE CLUBS FINANCIEROS Y PROFESIONALES**

 ARMAS DE FUEGO
 MOTOCICLETAS
 VEHICULOS DE MOTOR
 FUMAR
 BEBIDAS ALCOHOLICAS
 LUCHA CONTRA EL FUEGO
 TRABAJO DE POLICIA
 ENERGIA NUCLEAR
 CIRUGIA
 CAZAR
 AVIACION GENERAL
 MONTAÑISMO
 GRANDES CONSTRUCCIONES
 BICICLETAS
 PESTICIDAS
 ESQUIAR
 NADAR
 AVIACION COMERCIAL
 ENERGIA ELECTRICA
 FERROCARRILES
 RUGBY UNIVERSITARIO
 ANTICONCEPTIVOS
 AEROSOLES
 RAYOS X
 MAQUINARIA AGRICOLA
 ANTIBIOTICOS POR PRESCRIPCION
 ELECTRODOMESTICOS
 CONSERVANTES ALIMENTARIOS
 VACUNACIONES
COLORANTES ALIMENTARIOS

# Las pisadas fósiles de Laetoli

*En este yacimiento de Tanzania se hallan miles de huellas de animales, incluso de antecesores del hombre, impresas en cenizas volcánicas depositadas hace 3,5 millones de años*

Richard L. Hay y Mary D. Leakey

Cerca del lago Eyasi, en Tanzania, hay una serie de capas de ceniza volcánica, célebres por contener restos de primitivos homínidos, de los más antiguos que se conocen: datan de hace entre 3,5 y 3,8 millones de años. Esas capas de ceniza cuentan con un caso más insólito aún de conservación: pisadas fósiles. Ya van descubiertas en esos estratos varias decenas de miles de huellas de animales. La supervivencia de tales pistas, normalmente efímeras, desde pisadas humanas hasta el carril del paso de un insecto, ofrece una animada visión de la vida en la sabana africana mucho antes del período cuaternario. ¿Cómo eludieron ser borradas?

La extensa formación que los geólogos llaman Capas de Laetolil aflora en unos 1500 kilómetros cuadrados en la meseta de Eyasi, un bloque elevado por fallas al noroeste del lago Eyasi. Esos estratos recubren un zócalo de antiguas rocas de edad precámbrica y están, a su vez, festoneados y recubiertos hacia el este por grandes volcanes. Los afloramientos más ricos en fósiles se ubican en la zona restringida llamada Laetoli, con una extensión de unos 70 kilómetros cuadrados, cerca de la divisoria que corre entre el lago Eyasi y el barranco de Olduvai, al norte, y a 1700 o 1800 metros de altitud.

Los fósiles yacen sobre todo en los 40 a 60 metros superiores de estas capas, que en Laetoli alcanzan potencias superiores a 130 metros. Unas tres cuartas partes del tramo superior de la formación consta de tobas eólicas: capas de ceniza redepositada por el viento después de la lluvia volcánica original. La mayoría de las demás capas de ceniza, que alternan con las tobas eólicas, son cenizas "de proyección aérea", esto es, depósitos de ceniza que quedaron fundamentalmente tal cual cayeron de la nube volcánica. Compuesta en su mayor parte por partículas del tamaño de arena fina (0,125 a 0,25 milímetros) y granos de arena mediana (0,25 a 0,50 milímetros), la ceniza eólica sepultó huesos y dientes de animales, huevos de aves, caracoles y otros objetos dispersos por el suelo. Todas las cenizas, las eólicas y las de proyección aérea, brotaron de un volcán: Sadiman, unos 20 kilómetros al este de Laetoli.

En 1935, la zona fue explorada por Louis Leakey, el geólogo Peter Kent y Mary Leakey, uno de los autores; el grupo descubrió que los fósiles de animales de Laetoli eran más antiguos que los del nivel inferior (Miembro 1) del barranco de Olduvai. En 1938-39, una expedición dirigida por Ludwig Kohl-Larsen, de la Universidad de Tübingen, recolectó gran cantidad de fósiles en la zona, incluso un fragmento de maxilar de homínido. En 1974, Mary Leakey encontró más restos de homínidos en mejor estado de conservación. A partir de entonces se han proseguido investigaciones sistemáticas, desde 1975 hasta la fecha, que han proporcionado cuantiosos fósiles de homínidos, sobre todo mandíbulas y dientes, entre una gran diversidad de otros fósiles de vertebrados.

En 1976, Andrew Hill, de la Universidad de Harvard, fue el primero en dar con pistas de animales, en una capa de toba que desde entonces se llama la Toba de Pisadas. El año siguiente, Peter Jones, de la Universidad de Oxford, y Philip Leakey encontraron huellas, bastante mal conservadas, de pies, probablemente de homínidos, en la misma capa, y, en 1978, Paul I. Abell, de la Universidad de Rhode Island, descubrió una huella inconfundible de pie humano impreso en la toba en otro lugar. Una limpieza de la superficie del estrato reveló más huellas humanas en dos largos rastros paralelos.

Algunas de las capas tobáceas contienen biotita, un mineral potásico. Ello permite datar esas capas por el método de potasio-argón, que se basa en la conversión por radiactividad del isótopo potasio 40 en el gas noble argón. Analizando muestras de biotita de un lecho situado bajo los estratos fosilíferos inferiores en aquel sitio, y otras de cerca del techo de la formación, Garniss H. Curtis y Robert Drake, de la Universidad de California en Berkeley, obtuvieron fechas potasio-argon que indicaban la localización temporal de la Toba de Pisadas. Las muestras del muro daban una edad de 3,8 millones de años; las cifras de edad de la misma Toba de Pisadas y las de arriba se agolpaban en torno a los 3,5 millones de años.

En general, los animales fosilizados en Laetoli son de tipos semejantes a los que viven hoy día por allí. En orden de abundancia decreciente, los restos más comunes de vertebrados son de bóvidos (antílopes y semejantes), lagomorfos (concretamente liebres), jirafas, rinocerontes, équidos, cerdos y dos géneros de proboscídeos (elefantes y dinoterios, el último ya extinguido). Significativamente, en los sedimentos tobáceos faltan restos de cocodrilos, hipopótamos y otros animales de hábitos acuáticos.

Se cuentan hasta 50 niveles de tobas de proyección aérea alternando con tobas eólicas en las Capas de Laetolil. Muchos de ellos se encuentran por toda la zona fosilífera y pueden así servir para la correlación estratigráfica. La mayoría de las tobas de proyección

**PISTAS PARALELAS de pisadas de homínidos discurren a lo largo de 25 metros de ceniza volcánica en el sitio *G*, una de las 16 localidades de Laetoli en que se han descubierto pistas de varios animales en la serie de cineritas que se conocen como Toba de Pisadas. Las huellas que hay a la derecha de las pistas de homínidos son de *Hipparion*, un caballo de tres dedos extinguido. La pista de homínido de la izquierda es del menor de los tres andantes erguidos; la otra es de un individuo mayor, cuyas huellas fueron parcialmente borradas por otro de menor talla que caminó sobre ellas. No puede juzgarse si caminaron juntos o en distinta vez. La foto se publica por cortesía de John Reader, © National Geographic Society.**



**UN PARASOL PORTATIL** ofrece protección a Mary Leakey (*izquierda*), R. J. Clarke, del Museo Nacional de Bloemfontein (*centro*) y dos técnicos, mientras despejan la toba que recubre las pistas de homínidos en el sitio *G*, en 1979. Abell, de la Universidad Rhode Island, descubrió las pistas en 1978.



**TRAZOS PARALELOS**, de unos 6 centímetros de largo, marcan el paso de un insecto por cenizas de Laetoli. Puede haber sido una moscarda escatófaga.



**IMPRONTA DE ZARPA**, de 3,5 centímetros de diámetro anteroposterior, otra de los miles de huellas de Laetoli. Corresponde en este caso a un felino.

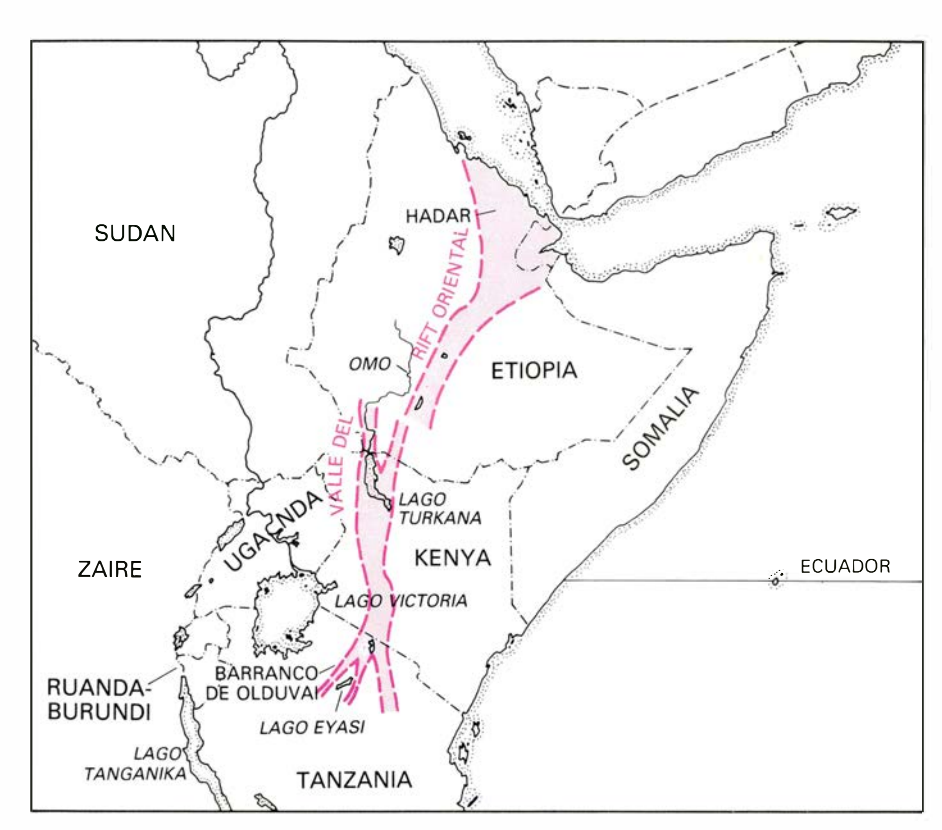
aérea tienen de uno a diez centímetros de grosor y no son laminadas; cada capa se produjo, evidentemente, en una erupción distinta del Sadiman. Sin embargo, tres de ellas son laminadas. Su grosor varía de 12 a 30 centímetros y obviamente proceden de una serie de erupciones seguidas. Mientras que las partículas de ceniza que forman las tobas eólicas son del tamaño de arenas finas a medias, las de las tobas de proyección aérea oscilan del de arenas finas a gruesas (0,5 a 1 mm). Formadas por fragmentos de lava cristalina, estas partículas son pobres en sílice y contienen melilita, un mineral rico en calcio.

Un constitutivo adicional de la mayoría de las tobas de proyección aérea, y quizá de todas, es ceniza de carbonatita. Este material ígneo contiene carbonato cálcico, con o sin carbonato sódico. La ceniza de carbonatita es realmente insólita. Sólo se conoce en el mundo un volcán que haya emanado carbonatita en tiempos modernos, el Oldoinyo Lengai, 90 kilómetros al norte de Laetoli. La carbonatita del Oldoinyo Lengai y la de las Capas de Laetolil son del tipo rico en carbonato sódico. Este hecho nos da una clave para entender la conservación de huellas en la Toba de Pisadas.

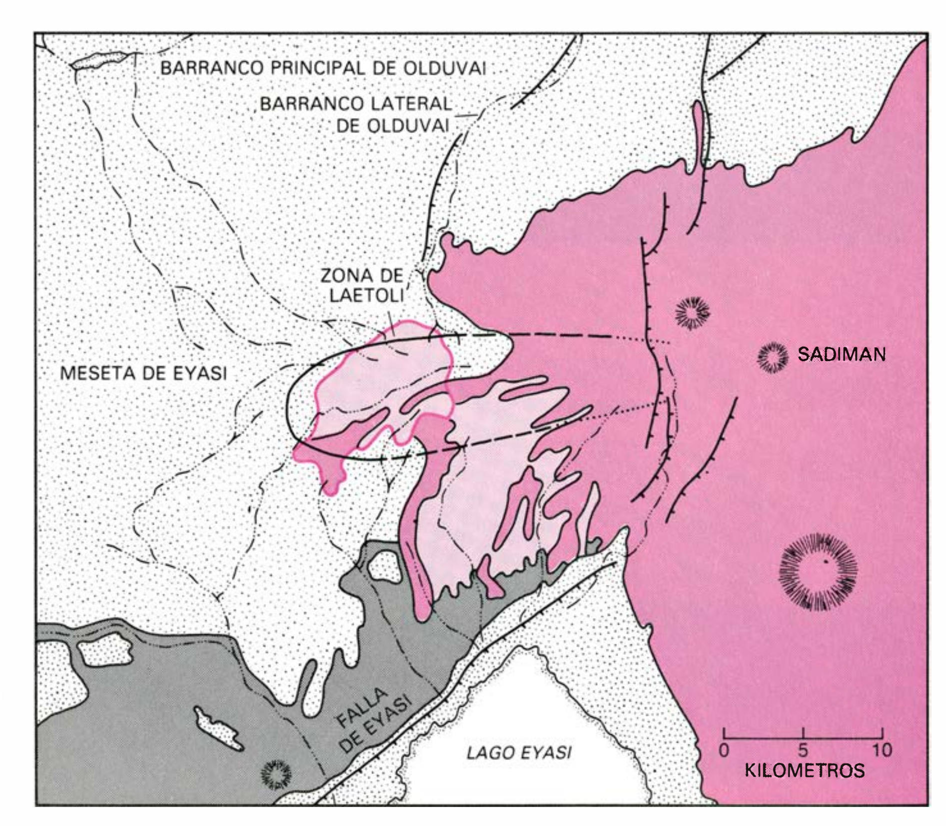
Una carbonatita que contiene a la vez carbonato cálcico y carbonato sódico reacciona con el agua de un modo característico. El carbonato cálcico forma un fino precipitado y el carbonato sódico se disuelve. Cuando se evapora la solución, se forman cristales del mineral trona; esos cristales proporcionan un cemento instantáneo para los lechos de ceniza.

La Toba de Pisadas es una de las tres tobas de proyección aérea laminadas de las Capas de Laetolil. Se han hallado huellas fósiles en las tres tobas laminadas, pero en aquella son particularmente abundantes y extendidas. La Toba de Pisadas, generalmente de 12 a 15 centímetros de potencia, yace casi al techo de la zona fosilífera y está recubierta por un depósito más masivo de ceniza, de 50 centímetros de grosor en algunos sitios. Los finos lechos de cenizas que integran la Toba de Pisadas se acumularon en los estadios iniciales de un episodio eruptivo; la toba más gruesa que la recubre representa la culminación del episodio.

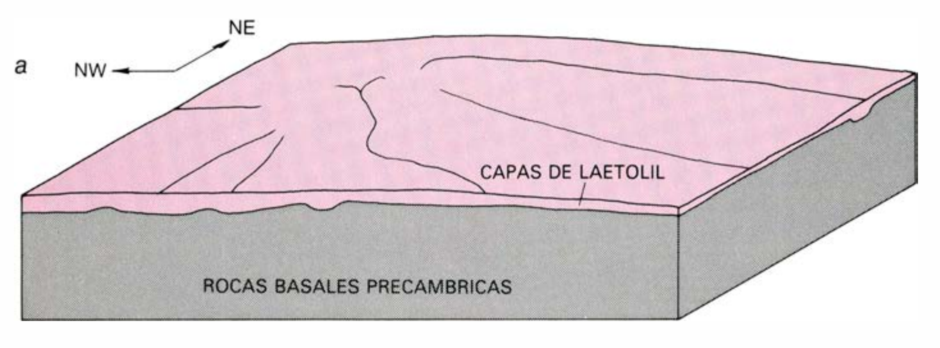
La Toba de Pisadas puede dividirse en dos unidades principales. La inferior tiene de siete a diez centímetros de grueso; la superior, entre cuatro y seis. El contacto entre ambas es nítido, y la superficie superior de la unidad in-

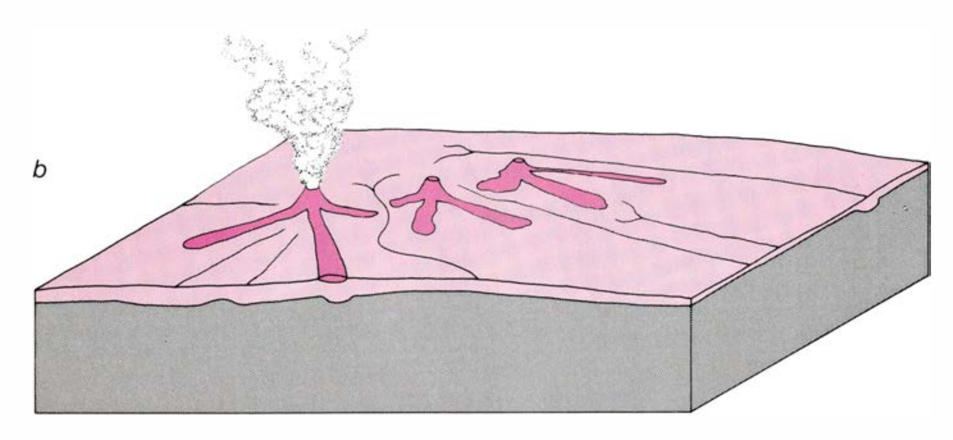


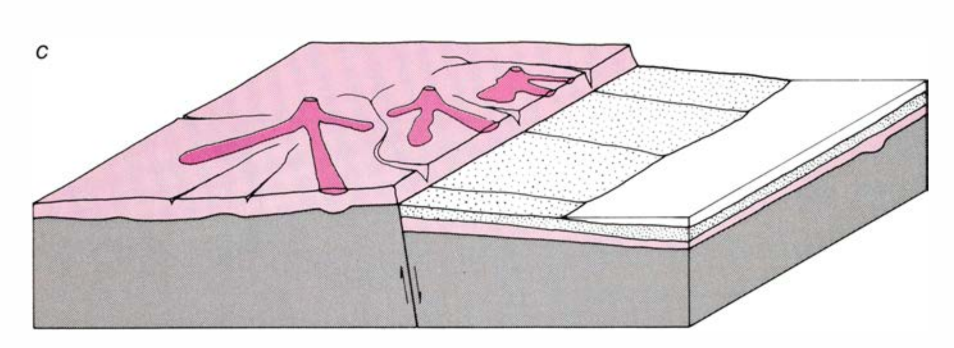

**EL LAGO EYASI**, al sudeste del lago Victoria, en Tanzania, se halla en el extremo meridional del valle del Rift oriental, que cruza Kenya y Etiopía hasta el mar Rojo. Se han descubierto abundantes restos de homínidos primitivos en el valle y sus aledaños. Entre los yacimientos más conocidos de homínidos se cuentan los de Hadar y Omo, en Etiopía, este del Turkana, en Kenya, y el barranco de Olduvai y zona de Laetoli, en Tanzania. En las tobas de Laetoli abundan los fósiles, pistas de animales y huellas de pisadas.




**LAS CAPAS DE LAETOLIL**, depósitos de ceniza volcánica al norte del lago Eyasi, afloran en una área de 1500 kilómetros cuadrados (*color claro*). Recubren rocas del basamento precámbrico (*gris*) al oeste, y subyacen a rocas volcánicas (*color oscuro*) al este. Los estratos más ricos en fósiles están en la zona de Laetoli, de 70 kilómetros cuadrados, silueteada en color. La Toba de Pisadas, que yace casi al techo de los estratos fosilíferos, pasa generalmente de 12 centímetros de potencia, dentro de la línea oval negra. La ceniza volcánica depositada en las Capas de Laetolil procede de erupciones del cercano volcán Sadiman.



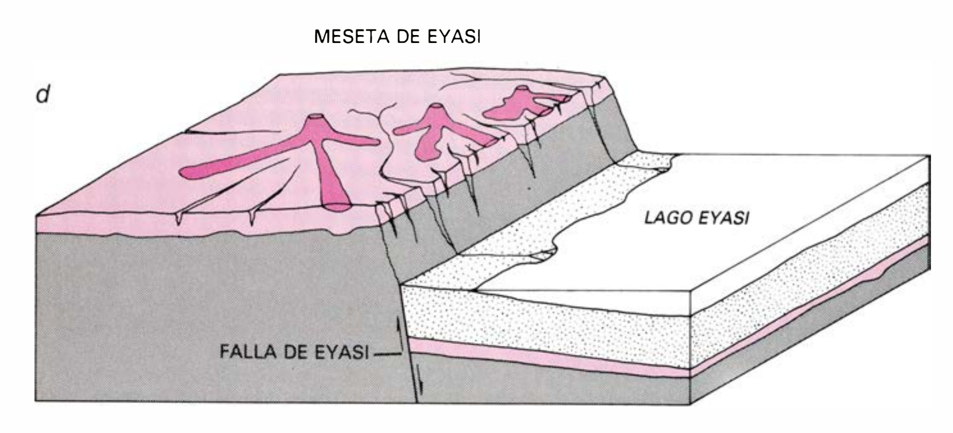




**DIAGRAMA EN CUATRO BLOQUES,** donde se muestra el desarrollo de la región de Eyasi. Cuando se depositó la ceniza de las Capas de Laetolil, hace de ello unos 3,5 o 3,8 millones de años (*a*), la región era una sabana relativamente llana. Unos 1,2 millones de años después (*b*), la región entró en una importante fase de actividad volcánica. Al cabo de otros 1,2 millones de años (*c*), al fallarse esta parte del valle del Rift, se elevó la meseta de Eyasi y se formó un lago en la parte deprimida. La erosión (*d*) y posteriores levantamientos dieron al paisaje su aspecto actual. Los dibujos del artículo son de Andrew Tomko.

ferior está erosionada en algunos sitios. Las dos unidades difieren en su composición litológica, en su estructura y en las huellas que contienen.

La unidad inferior se subdivide en 14 delgados lechos, de 2 a 15 milímetros de grosor. Estos lechos se pueden reconocer generalmente por toda la zona de Laetoli; cada uno es muy probablemente producto de una erupción volcánica distinta. La mayoría de ellos cubren irregularidades de la superficie, como las huellas, sin apenas cambiar de grosor. Ello prueba que permanecieron fundamentalmente inalterados allí donde se depositaron.

La superficie de cinco lechos está ampliamente picada por el impacto de gotas de lluvia; otros tres llevan marcas de lluvia a trechos. Las salpicaduras son densas y bien definidas. Evidentemente se deben a chubascos lo bastante fuertes para mojar la ceniza, pero no para erosionarla. Las pisadas indentan la superficie de la capa superior (número 14) y la de siete de las otras 13 subyacentes; son especialmente abundantes y extendidas en los lechos 9 y 14. Pero son más escasas las pisadas en otros lechos de ceniza.

La unidad superior de la Toba de Pisadas ofrece un cuadro algo diferente. Consta de sólo cuatro capas, cada una de las cuales representa bien una sola erupción volcánica o una serie de erupciones consecutivas. Las capas se redepositaron ampliamente por acción del agua corriente asociada con fuertes precipitaciones. Las dos capas inferiores cubren irregularidades de relieve, pero ambas son más gruesas en depresiones, tales como las pisadas, que en zonas elevadas, como los bordes de éstas. La mayoría de las zonas elevadas están truncadas en la base de la tercera capa que es, en muchos sitios, una superficie de erosión. Donde hubo redeposición de cenizas, los lechos aparecen laminados y la toba laminada de cada lecho puede rellenar los canales anchos y someros abiertos en las capas subyacentes. En la unidad superior, las pisadas abarcan una amplia extensión de la superficie de los lechos 1 y 2. En la capa 2 se han hallado en un sitio huellas de lluvia.

Como advertimos arriba, la mayor parte de la ceniza de la Toba de Pisadas consta de partículas de lava que contienen melilita, mineral rico en calcio. Las partículas son de forma ovoide o esferoidal, y en su mayoría tienen el tamaño de granos de arena finos a medianos (0,1 a 0,3 milímetros). Hay partículas de calcita toscamente cristalina, de forma entre redondeada y aplanada,

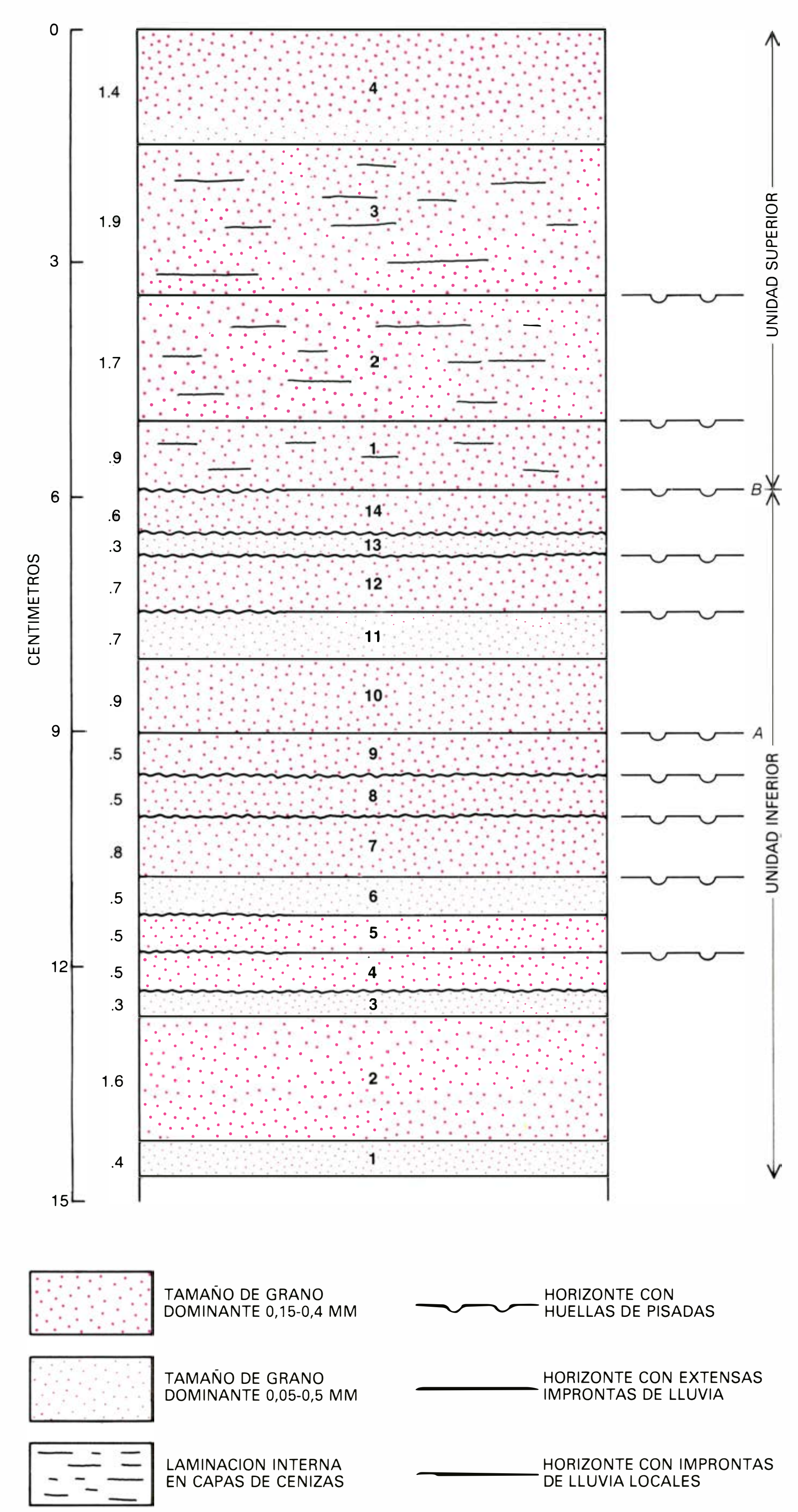
generalmente de 0,02 a 0,01 milímetros de largo, muy dispersas y puntualmente abundantes en la capa basal (número 1) de la unidad inferior. Partículas semejantes de calcita se encuentran en algunos lugares en los lechos 2 a 5.

La calcita contiene concentraciones de estroncio y bario relativamente altas (una "rúbrica" química de las carbonatitas). Sin embargo, la textura que aparece al microscopio muestra que la calcita ha sustituido a lo que originalmente era un mineral carbonatítico rico en sodio, como la nyererita. Las partículas de calcita representan sin duda sólo una pequeña fracción de las partículas originales de ceniza carbonatítica; la mayor parte de la ceniza habría desaparecido reaccionando con el agua (como ocurre en el proceso que lleva a la formación de minerales de trona).

La trona, mineral soluble en agua, se disolvió hace tiempo; las capas de la Toba de Pisadas están ahora cementadas por calcita y, más raramente, por filipsita (un silicato alumínico). Algunos lechos constan mayormente de cemento, en el que parecen flotar las partículas de ceniza. Estos lechos se interpretan como depósitos cineríticos, en los que gran parte del espacio relleno hoy con cemento estuvo en su origen ocupado por carbonatita. Las capas ricas en cemento dominan en la unidad inferior de la toba y escasean en la superior, que presumiblemente recibió una menor proporción de ceniza carbonatítica.

La superficie sepultada bajo la Toba de Pisadas era casi plana. Las mayores desigualdades eran depresiones estrechas y largas de unos 10 centímetros de hondo. Se interpretan como pistas de reses a través de la sabana pliocena. Raicillas fósiles, subyacentes a la Toba de Pisadas, sugieren la presencia de hierba. El suelo, sin embargo, debía de ser fundamentalmente raso cuando se depositaron los primeros lechos de la Toba de Pisadas; de haber hojas enhiestas habrían interrumpido la delicada deposición de la ceniza. Lo más probable es que los herbívoros de la sabana rozaran la hierba hasta esquilmarla.

Los excrementos fósiles de liebres, jirafas y de los diminutos antílopes llamados dik-dik abundan en la base de la Toba de Pisadas. Asimismo se encuentran ramas y ramitas fosilizadas de árboles y arbustos. Se han encontrado unos pocos palos, espinas y hojas fósiles de acacia, árbol típico de la sabana, en capas superiores de la unidad inferior; una de éstas contiene coprolitos




**CORTE DE LA TOBA DE PISADAS** en un punto donde alcanza casi 15 centímetros de potencia. Ocho de las catorce subdivisiones de la unidad inferior tienen improntas de huellas; éstas abundan sobre todo en los horizontes *A* y *B*. Dos de las subdivisiones de la unidad superior también llevan huellas. Las pistas humanas aparecen en el horizonte *B*. A la izquierda se indica la potencia media de cada lecho en *A*.



**PISADA DE ELEFANTE, que aparece como una depresión suave, grande y circular en este afloramiento del nivel 1 de la unidad superior, un horizonte de estación húmeda. Se distinguen otras pisadas dentro de la grande; probablemente sean de animales pequeños, quizá liebres. La escala mide 20 centímetros.**

(excrementos fósiles) de liebres y, quizá, jirafas.

La Toba de Pisadas se depositó en un breve lapso, quizás unas semanas, entre el final de la estación seca y el comienzo de las lluvias. La excelente preservación de las pisadas, y también de las improntas de gotas, muestra que las capas de toba debieron quedar sepultadas por nueva lluvia de cenizas poco después de imprimirse las huellas. Otra prueba de que el proceso de enterramiento fue rápido está en la continuidad de los lechos, algunos de sólo pocos milímetros, en una extensión de 70 kilómetros cuadrados.

Hay una evidencia más del corto lapso del acontecimiento. La ausencia de hojas de hierba en la base de la toba sugiere que las primeras erupciones volcánicas sobrevinieron en la estación seca. Las improntas de lluvia en la unidad inferior fueron causadas probablemente por breves chubascos cuando el estiaje llegaba a su fin. En cambio, la redeposición de cenizas en la unidad superior por arroyadas indica un período de lluvias más fuertes, verosímilmente al comienzo de la temporada pluvial. Más aún, la extensa erosión en la base de la unidad superior y entre sus niveles 2 y 3 puede claramente atribuirse a fuertes precipitaciones. Por último, la escasez de improntas de lluvia en la superficie de las capas de la unidad superior puede achacarse al hecho de que los sedimentos saturados por la lluvia no conservan semejantes huellas.

Puesto que la Toba de Pisadas está bien cementada y es más resistente a la erosión que los depósitos a su muro y a su techo, ha aguantado expuesta a los agentes en grandes extensiones. Cuando la toba se meteoriza, salta fácilmente según los planos de estratificación entre las capas, dejando patentes las huellas en su superficie. Se han estudiado pisadas en 16 localidades de Laetoli; estos afloramientos se han siglado como sitios *A* a *P*.

El mayor afloramiento es el sitio *A*, que conserva pistas netas en unos 800 metros cuadrados. Hemos contado el número de huellas en 17 metros cuadrados del sitio *A* y en 20 metros cuadrados del sitio *D* (que cubre unos 113 metros cuadrados) para llegar a una estimación de la densidad de pisadas. Las pequeñas huellas de liebres (y posiblemente de dik-dik) alcanzaron una media de 21 por metro cuadrado en el sitio *A* y 30 por metro cuadrado en el sitio *D*. Otras huellas, mayores casi todas, llegaron, respectivamente a 1,8 y 3,6 por metro cuadrado. Tomando como media 23 pisadas de todo tamaño por metro cuadrado, en solo el sitio *A* se conservarían unas 18.400 improntas.

Se han reconocido pisadas de animales pertenecientes a un total de 17 familias zoológicas distintas, que representan una mayoría de aquellos cuyos huesos se encuentran fósiles en las Capas de Laetolil. La distribución vertical de las huellas en los estratos concuerda con la hipótesis de que se imprimieron en el intervalo entre la estación seca y la de lluvias. De aquí que las huellas en la unidad inferior sean, sobre todo, de liebres, pintadas, rinocerontes y otros animales que permanecen en la sabana herbácea durante el estiaje. En cambio, las huellas de la unidad superior incluyen las de visitantes de la estación húmeda: proboscídeos, équidos, papiones y homínidos. En la unidad inferior no se encuentra ni una huella de éstos. Las pisadas de grandes antílopes son, a su vez, mucho más comunes en la unidad superior que en la inferior. Muy probablemente registren las migraciones estacionales características de la sabana de Africa Oriental. Las pistas siguen las sendas preexistentes e indican el andar de un paso normal. De aquí se puede concluir que las lluvias de cenizas del Sadiman no fueron lo bastante densas para perturbar los patrones habituales de desplazamiento estacional.

Las cinco pisadas descubiertas en 1977 que se atribuyen con probabilidad a homínidos están en el sitio *A*. Las dos pistas paralelas de pisadas humanas, halladas por primera vez en 1978, están en el sitio *G*. Estas dos pistas corren a 25 centímetros una de otra y se hallan expuestas en una distancia de 25 metros. Las pisadas mejor definidas tienen de uno a tres centímetros de profundidad y márgenes netos. Muestran el talón redondeado, el arco alzado y el grueso hallux típicos del pie humano. Una de las pistas es la de un único individuo pequeño. La otra es mixta: las huellas originales son de un individuo más bien grande, y una serie de pisadas se superpone a la anterior, de otro individuo de menor talla que pisaba sobre las huellas precedentes.

Las huellas de homínidos son una clara prueba de que hace tres millones y medio de años estos precursores africanos del hombre primitivo andaban completamente erguidos con un andar bípedo humano. Esto ocurría en un tiempo en que los homínidos de Africa eran pequeños según los cánones de la humanidad posterior, tanto en estatura

como en volumen cerebral. Suponiendo que, como en las poblaciones humanas modernas, la longitud del pie de los homínidos de Laetoli equivaliese aproximadamente al 15 por ciento de su estatura, el menor de los tres que dejaron sus huellas en el sitio *G* medía 1,20 metros. El siguiente tendría 1,40. La longitud de las huellas del tercer y mayor individuo no pueden medirse porque están sobreimpresas y en parte borradas por las del mediano.

Una postura erguida tan temprano en el curso de la evolución humana es de gran importancia. Deja las manos libres para acarrear y manejar y fabricar utensilios. A pesar de diligentes búsquedas, no se han encontrado utensilios de piedra en las Capas de Laetolil. Parece, pues, verosímil que los homínidos que dejaron sus huellas en la Toba de Pisadas no habían alcanzado la capacidad de fabricar utensilios líticos. Queda en pie el hecho de que su postura erguida les permitía el uso a tiempo completo del primer utensilio de los primates: manos desembarazadas.

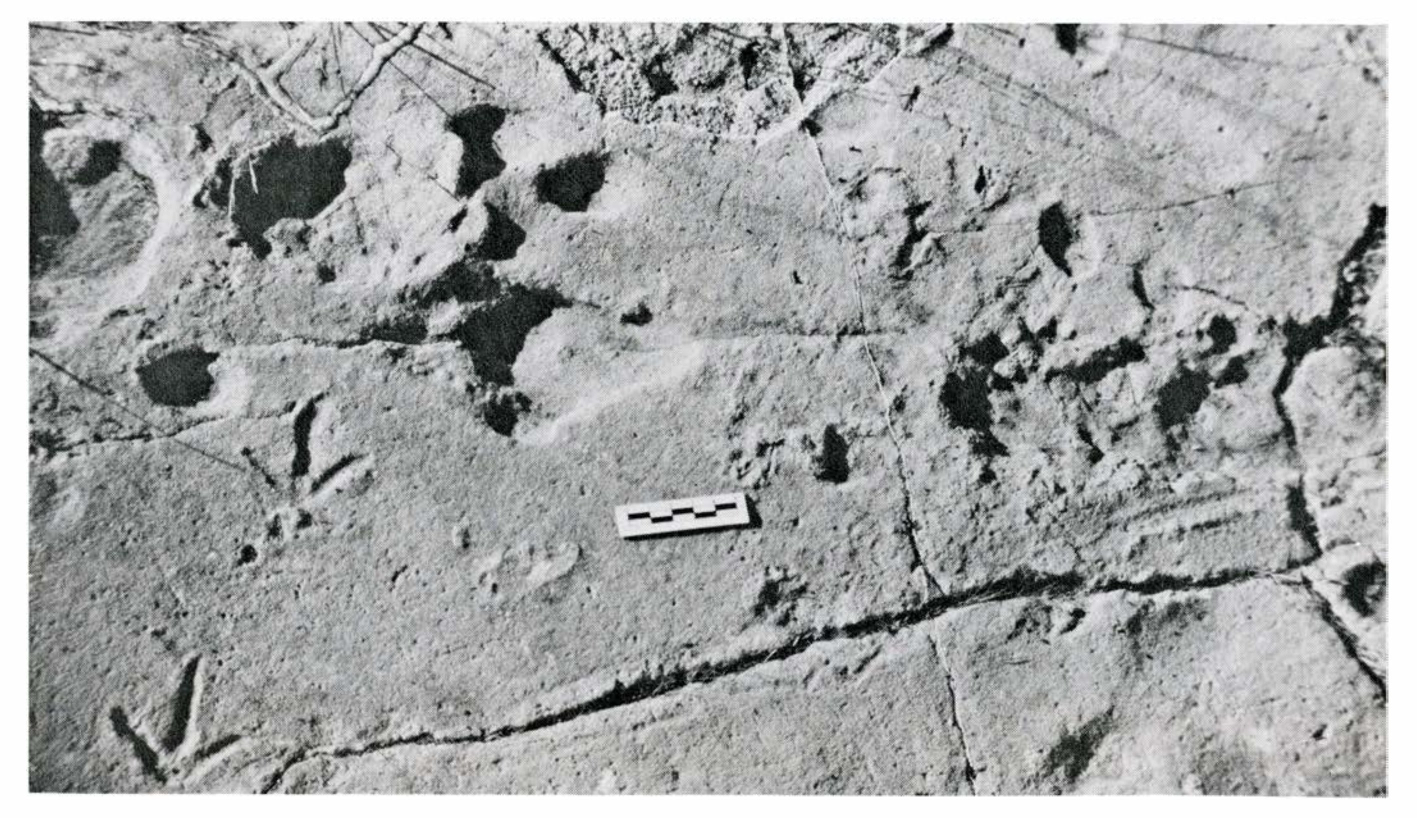
La gama de huellas no homínidas en la Toba de Pisadas va desde muy grandes a minúsculas. Entre las primeras, las hay de elefantes, dinoterios, jirafas y rinocerontes. Las menores representan un pequeño felino, liebres, pintadas, francolines (aves algo menores que las gallinas de Guinea) y un insecto (posiblemente una moscarda escatófaga).

Tanto la impresión como la preservación de pisadas fósiles requieren un conjunto bastante especial de circunstancias. Primero, el suelo debe ser lo suficientemente blando y coherente para retener huellas nítidas. Segundo, éstas deben quedar sepultadas antes de que procesos destructivos como la erosión puedan alterarlas o borrarlas. Finalmente, el material que las recubre debe poder separarse más tarde limpiamente de la superficie que lleva las improntas. Muchas de las huellas fósiles que se conocen se imprimieron en sedimentos fangosos que se endurecieron al secarse y fueron sepultados por arena o lodo. El caso de la ceniza volcánica de la Toba de Pisadas es totalmente diferente; tiene la textura de arena de grano fino a medio. Un material insólito para la conservación de huellas.

La naturaleza de una huella en arena no consolidada depende en gran parte de la humedad de la arena. Si ésta es suelta y seca retendrá claramente las pisadas de pequeños animales. No preservará las huellas profundas de animales grandes porque los bordes abruptos de las improntas se desmoronarán hacia dentro. La arena húmeda preservará las pisadas de grandes animales, pero no recibirá las de los pequeños. Para preservar las de unos y otros, la arena debe estar sólo ligeramente húmeda.

La nitidez de las pistas de animales menores en la Toba de Pisadas muestra que la ceniza estaba blanda cuando se formaron las huellas. Al mismo tiempo, los márgenes verticales bien definidos de algunas improntas de animales mayores revelan que la ceniza era bastante compacta. (Algunas de las huellas grandes tienen suaves pendientes hacia dentro, que sugieren cierto deslizamiento de ceniza suelta.) La mayoría de las grandes huellas tienen un reborde alto, elevado por la presión de la pisada del animal. Las capas de cenizas debían de ser consistentes a sólo unos centímetros por debajo, pues las huellas mayores, las de rinocerontes y proboscídeos, no tienen comúnmente más de cinco centímetros de hondo.

Cuesta imaginar que, cuando se formaron las diferentes huellas, los diez lechos de ceniza que conservan las pistas pudieran tener la humedad adecuada. No obstante, ¿era esto estrictamente necesario? La respuesta es no. Así como mezclando ceniza de madera o cemento portland con arena seca se compactará la arena, pudo igualmente la carbonatita haber dado consistencia a la ceniza, proporcionando a sus partículas una matriz de grano fino. Si la carbonatita hubiera sido originalmente de grano fino, se habría contado con una matriz primaria conveniente al tiempo exacto de la deposición, y la reacción consiguiente de la carbonatita



**TRES ESPECIES de animales dejaron sus improntas en este trozo de toba expuesta. Abajo, a la izquierda, hay huellas de un ave; arriba, a derecha e izquierda, las de un pequeño mamífero, tal vez liebre o dik-dik. Hacia el centro-izquierda, huella de un pie de papión. Fotografía de Richard L. Hay.**

con el agua habría proporcionado una matriz secundaria, finamente granuda, de carbonato cálcico por precipitación. Entretanto, si el carbonato sódico de la carbonatita no era enteramente lesivado al disolverse por la lluvia, cristalizaría en forma de trona al evaporarse el agua, cementando débilmente la capa más superficial de ceniza y fijando las huellas hasta que éstas quedaran sepultadas por la siguiente lluvia de ceniza.

A lo largo de los miles de años que siguieron, las capas de ceniza de la Toba de Pisadas se modificaron por una diversidad de procesos. Primero, la reacción de la carbonatita con el agua produjo una abundancia de calcita que en los primeros estadios habría cementado ligeramente las capas de ceniza sustituyendo también a la basura y residuos vegetales en la ceniza: en este estadio, insectos y otros animales la surcaron. Mientras las tobas sufrían la meteorización, la ceniza y la melilita se transformaban en arcilla montmorillonítica y el silicato alumínico filipsita se depositaba localmente como un cemento adicional. Después, la calcita llenó casi todo el espacio poroso restante, convirtiendo las capas de ceniza en una roca dura bien cementada. La calcita se depositó también entre lechos de ceniza en forma de delicadas y discontinuas láminas. De este modo recubrió muchas pisadas de homínidos del sitio *G*, facilitando que más tarde fueran despejadas sin alterarse.

Para resumir, una serie rarísima de condiciones dieron origen a la Toba de Pisadas. Hace unos 3,5 millones de años, la zona de Laetoli mantuvo una abundante y variada población animal. Las lluvias de ceniza volcánica que se abatieron sobre la zona no fueron lo bastante densas para ahuyentar a los animales. La excelente definición de una multitud de huellas y pistas impresas en la ceniza fresca fue el resultado de una mezcla de carbonatita, material ígneo poco frecuente, con las partículas típicas de ceniza volcánica; las capas de cenizas con esas improntas iban quedando sepultadas a intervalos frecuentes por nuevas cenizas. Finalmente, una densa lluvia de cenizas enterró profundamente la Toba de Pisadas, protegiéndola de la erosión, y las capas con improntas se cementaron convirtiéndose en roca dura. Cuando la meteorización actual separó las capas de toba por los planos de estratificación, abrió una ventana singular al mundo de los primitivos homínidos y de los animales con los que vivieron.

# Así entra y sale de su hospedador un virus animal

*Experimentos realizados con el virus Semliki Forest muestran, con considerable detalle, cómo la célula se ve obligada a fabricar nuevas partículas de virus, cuya membrana externa es un fragmento de la propia membrana plasmática celular*

Kai Simons, Henrik Garoff y Ari Helenius

La célula constituye la unidad de estructura y función de animales y plantas. Para un virus, sin embargo, no es más que un medio que le permitirá fabricar nuevas partículas de sí mismo. Consta la partícula vírica de una o varias cadenas de ácido nucleico (ADN o ARN) encerradas en una cubierta de proteína denominada cápside. En muchos virus, la propia cápside queda, a su vez, encerrada dentro de una membrana que lleva partículas de proteína incorporadas, cual si se tratara de la membrana externa de una célula animal. El ácido nucleico albergado en el interior de la partícula constituye la información genética que necesita el virus para replicarse. Sin embargo, la partícula de virus carece del aparato necesario para transformar esta información en su propia estructura acabada. Este aparato se lo proporciona la célula hospedadora. El virus penetra en la célula y se aprovecha de su maquinaria biosintética para fabricar sus propias partes componentes. Cuando se han fabricado suficientes elementos, se asocian para dar nuevas partículas víricas, que abandonan la célula e infectan a otras.

Se conoce desde hace algunos años la naturaleza general de la infección vírica, pero los mecanismos moleculares precisos mediante los cuales el virus entra y sale de la célula son aún objeto de estudio. Aunque se ignoran pormenores del proceso infectivo, no se duda ya de que sólo unas pocas reacciones del ciclo biológico vírico son específicas de la partícula. En su mayor parte, el virus utiliza las reacciones metabólicas normales del hospedador. En nuestro estudio del virus de Semliki Forest (virus del bosque de Semliki), un virus de ARN que infecta animales, hemos encontrado que penetra en la célula siguiendo la misma ruta que muchas moléculas requeridas en el metabolismo celular.

Cuando las proteínas de la membrana externa del virus se han unido a la membrana de la célula, ésta engloba a la partícula de virus y se forma una vesícula. Dentro de la célula, la vesícula se une a otras; finalmente, la partícula de virus va a pasar a una gran vacuola, el lisosoma. (El interior ácido del lisosoma contiene enzimas que pueden degradar macromoléculas, como proteínas y ácidos nucleicos.) Sólo entonces tiene lugar una reacción que es específica de los virus: la membrana externa del virus se fusiona con la del lisosoma, liberando la cápside y su contenido de ARN al citoplasma de la célula y permitiendo así que escapen de los enzimas degradativos del lisosoma. Puede entonces empezar el proceso de replicación de la partícula de virus.

La duplicación del ARN vírico y la fabricación de las proteínas de la cápside y las proteínas de la membrana se efectúan, casi por entero, a través de los procesos metabólicos normales de la célula. El nuevo ARN y las nuevas proteínas de la cápside se reúnen en el citoplasma para constituir un nuevo cuerpo central del virus: la nucleocápside. Las proteínas destinadas a la membrana externa del virus se sintetizan, modifican, transportan e insertan en la membrana celular de igual manera que las propias proteínas de la membrana de la célula. La nucleocápside recién fabricada avanza luego hacia la membrana de la célula; las proteínas de la cápside se unen a las proteínas víricas que están en la membrana de la célula, esquivando las proteínas propias de la membrana celular del hospedador. A medida que transcurre esta unión, la membrana celular se curva en torno a la nucleocápside. Una vez que las moléculas proteicas de la cápside están ligadas a las proteínas víricas de la membrana celular, la partícula de virus sale de la célula. El virus Semliki Forest se comporta como el más gorrón de los invitados: se cuela en la célula hospedadora a través de los procesos normales de ingestión celular, expropia la maquinaria de la célula, la utiliza para fabricar sus propios componentes y se marcha arropado en un trozo de la membrana de la célula.

El virus de Semliki Forest, que lo abreviaremos por SFV, se aisló por primera vez, en 1944, a partir de tejidos del mosquito; se le bautizó con el nombre del bosque lluvioso del sur de Uganda en donde se encontraron esos dípteros. Los virus suelen agruparse en tres categorías: los que infectan a células animales, los que infectan a células vegetales y los que infectan a bacterias. Habida cuenta de las diferencias en la composición de las células hospedadoras, la forma de entrar y salir de los tres tipos de virus varía un tanto. El Semliki Forest es un virus animal que infecta una amplia gama de vertebrados y de invertebrados. Está estrechamente emparentado con los virus que causan la fiebre amarilla y el dengue. Causa encefalitis en el ratón. No suele ser, sin embargo, patógeno para el hombre.

El virus de Semliki Forest pertenece a la clase de virus conocidos como togavirus, pequeños y esféricos. Presentan una estructura relativamente sencilla. El nombre del grupo se debe al hecho de que todos sus miembros poseen una membrana –una "toga"– en torno a la cápside. Esta característica les diferencia de los virus en los que la superficie más externa de la partícula está formada por la cápside. En el centro del SFV hay una molécula de ARN monocatenario, una cadena de 12.700 nucleóti-

dos. (Los nucleótidos que forman una molécula de ARN constan de una molécula de azúcar, un grupo fosfato y una base nitrogenada.)

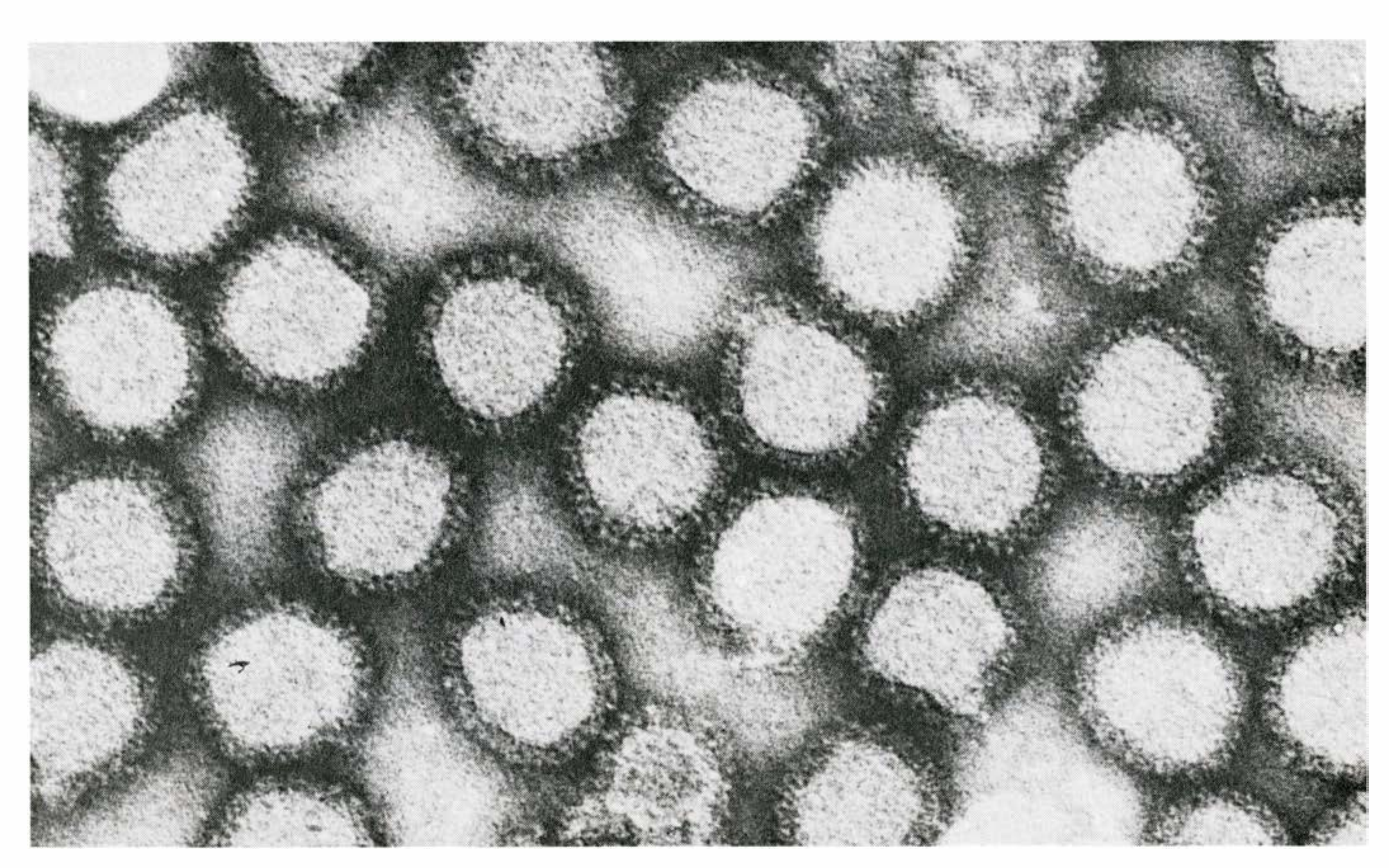
La relativa simplicidad del virus de Semliki Forest se manifiesta en el hecho de que cada partícula de virus incorpora sólo cuatro clases de moléculas de proteína. La cápside consta de 180 moléculas de la así llamada proteína de la cápside, o proteína *C*. Cada molécula de proteína *C* es una cadena de 267 aminoácidos. La estructura de la cápside repite la de un icosaedro: poliedro de 20 caras, todas ellas triángulos equiláteros. En la cápside, cada triángulo se divide en tres triángulos más pequeños; la superficie de la cápside poseerá, pues, 60 caras. En cada vértice de las 60 caras hay una molécula de proteína *C*, lo que supone un total de 180 moléculas de proteína *C*.

Las otras tres proteínas del virus Semliki Forest se unen para formar protrusiones, a modo de espinas, que se extienden por la membrana externa del virus. Estudios bioquímicos han mostrado que en toda espina hay una molécula de cada una de las tres proteínas. Las proteínas se han designado por *E*1 (438 aminoácidos de longitud), *E*2 (422 aminoácidos de longitud) y *E*3 (66 aminoácidos de longitud). De cada una de las tres proteínas de la espina surgen cadenas laterales de carbohidratos; las proteínas con tales cadenas laterales hidrocarbonadas se denominan glicoproteínas.

Las glicoproteínas de las espinas de la membrana del SFV se entrelazan de manera complicada, de donde resulta que toda la proteína *E*3 y aproximadamente el 90 por ciento de las proteínas *E*1 y *E*2 están fuera de la superficie externa de la membrana del virus, formando la parte de la espina visible en las micrografías electrónicas. Cortos segmentos de *E*1 y *E*2 pasan a través de la membrana. El segmento de *E*1 que está dentro de la membrana mide dos aminoácidos y el de la molécula de *E*2 alcanza los 31 aminoácidos. Estos breves segmentos internos anclan la espina en la cápside.

Se ha establecido el orden de los aminoácidos, en las proteínas de la espina, determinando la secuencia, o sucesión, de nucleótidos en el ARN del virus. (Cada aminoácido está codificado por una secuencia de tres nucleótidos.) Resulta más difícil determinar la sucesión completa de aminoácidos de las proteínas que atraviesan las membranas vía análisis de las propias proteínas. Ocurre que pocas veces se obtiene la proteína libre de otras sustancias en cantidad suficiente para determinar la sucesión de aminoácidos. Sin embargo, en los últimos años, métodos para establecer rápidamente el orden de los nucleótidos de una molécula de ADN o de ARN han permitido abordar indirectamente el problema y descubrir, de forma relativamente simple, en qué orden están los aminoácidos. En colaboración con Anne-Marie Frischauf y Hans Lehrach, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL), hemos recurrido a ese método para analizar las proteínas de las espinas de la membrana del SFV.

Nuestro trabajo ha mostrado que tanto la proteína *E*1 como la *E*2 poseen un segmento insólito, formado, predominantemente, por aminoácidos hidrófobos (aminoácidos que repelen el agua). Un segmento ininterrumpido de tales aminoácidos raramente se encuentra en las proteínas, solubles en



**PARTICULAS DE VIRUS DE SEMLIKI FOREST; son las zonas redondas y claras que se aprecian en esta micrografía electrónica tomada por Carl-Henrik von Bonsdorff, de la Universidad de Helsinki. Las partículas aparecen aumentadas 200.000 diámetros. El virus de Semliki Forest (SFV) debe su nombre a la pluvisilva de Uganda, en donde se aisló por primera vez. Infecta a muchos animales, vertebrados e invertebrados. Virus afines causan encefalitis, pero el de Semliki Forest no es patógeno para el hombre. Como otros virus, el de Semliki Forest carece del aparato necesario para reproducirse. Sólo puede fabricar nuevas partículas penetrando en una célula animal y apropiándose del mecanismo biosintético de la misma. Cada partícula consta de una molécula de ARN monocatenario incluida en una cubierta de proteína llamada cápside, envuelta ésta en una membrana similar a la que rodea a la célula animal. Incrustadas en la membrana del virus hay moléculas de proteína que dan la sensación de una ligera capa de pelusa en torno a las partículas.**

agua, del citoplasma de la célula. Sin embargo, segmentos así se presentan también en otras proteínas de la membrana, además de las del virus Semliki Forest. Jere P. Segrest, Vincent T. Marchesi y sus colegas, del Instituto Nacional de Artritis, Metabolismo y Enfermedades Digestivas, basándose en el método directo, determinaron por vez primera el orden de los aminoácidos de una glicoproteína de la membrana con un segmento hidrófobo. Otras proteínas de la membrana (entre ellas inmunoglobulinas unidas a las membranas, proteínas antigénicas de los trasplantes y las proteínas de las espinas de otros virus) se analizaron más tarde por el método indirecto.

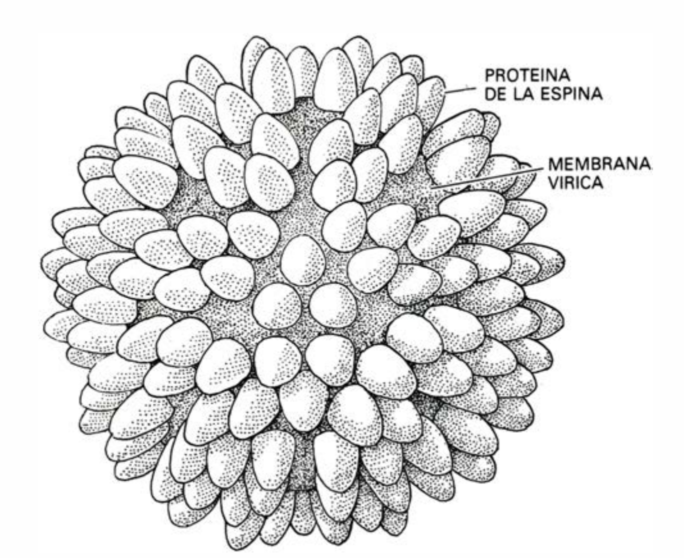
Todas estas proteínas comparten importantes propiedades estructurales con las proteínas de las espinas del SFV: cuando están en la membrana celular, la mayor parte de su masa permanece fuera de la célula. Mantienen su conexión con la membrana a través de un segmento de 20 a 30 aminoácidos hidrófobos, que se extiende a través de dicha envoltura; una pequeña protuberancia, formada por unos cuantos aminoácidos, se proyecta más allá de la membrana hasta el citoplasma. El estrecho parecido entre las proteínas de las espinas del SFV y las proteínas de la propia membrana de la célula hospedadora aparecerá aún más claro cuando describamos la síntesis de las proteínas de la espina.

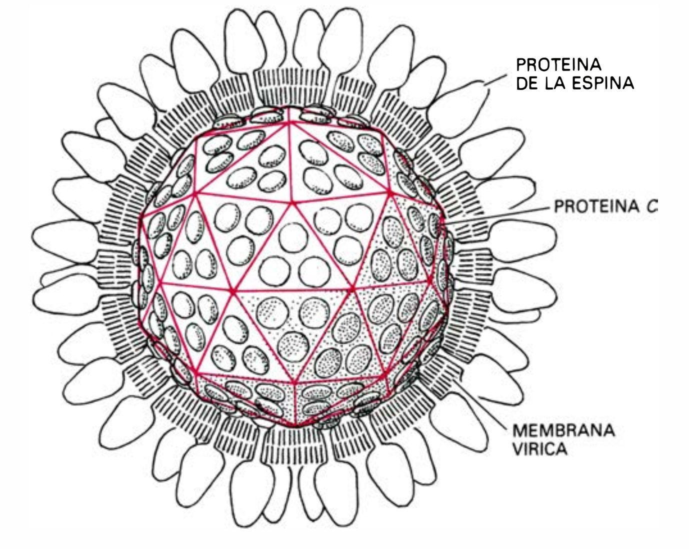
El virus de Semliki Forest es bastante peculiar en lo concerniente a sus moléculas proteicas; no hay, en la partícula vírica, ninguna proteína de la célula del hospedador. Las moléculas lipídicas de la membrana del SFV, por contra, sí proceden de la célula hospedadora. La membrana del SFV tiene la misma forma que la membrana de la célula animal: dos capas de moléculas lipídicas con una cierta variedad de glicoproteínas insertadas. (Estas moléculas lipídicas tienen una "cabeza" hidrófila y dos "colas" hidrófobas, formadas por extensas cadenas de ácidos grasos. En la membrana, las cabezas hidrófilas están situadas hacia el exterior y las colas miran hacia el interior.) Las moléculas lipídicas que hay en la membrana pueden desplazarse libremente hacia los lados, pero no verticalmente. Su movimiento sin restricción en dos dimensiones le confiere a la membrana propiedades de un líquido. Lo que resulta esencial para muchas de las funciones que cumple la membrana celular, incluido el proceso que conduce a la salida del virus de la célula hospedadora.

Las moléculas lipídicas aparecen en varias configuraciones, que se diferencian de acuerdo con los grupos químicos que integran la molécula. Las diferencias entre los lípidos han permitido identificar el origen de las moléculas lipídicas de la membrana del SFV. Ossi Renkonen y Leeri Kääriäinen y sus colegas, de la Universidad de Helsinki, han demostrado que la composición lipídica de la membrana de la partícula del SFV depende directamente de la célula hospedadora en la que se ha ensamblado la partícula de virus.

¿Cómo penetra el virus de Semliki Forest en una célula animal? Para intentar responder a la pregunta efectuamos la mayor parte de nuestro trabajo con cultivos de células de riñón de hámster. Los sistemas experimentales basados en células cultivadas no pueden explicar todo el proceso de infección del virus en un organismo entero. Pero sí pueden coadyuvar a aclarar cómo entra y sale de la célula. Conocíamos bastante bien los últimos estadios de la infección en células cultivadas; mas seguía sin dilucidarse el mecanismo de entrada del material genético del virus en el citoplasma de la célula hospedadora. Debía operar algún mecanismo activo, porque las macromoléculas, así como las proteínas, y estructuras mayores, los virus por ejemplo, no cruzaban la membrana celular por simple difusión.

Se habían propuesto dos mecanismos para explicar cómo logran entrar en las células animales los virus que poseen membranas externas. Quizá la entrada transcurriese mediante la fusión de la membrana del virus con la membrana de la célula. Si la membrana del virus quedara asimilada dentro de la membrana celular, la nucleocápside podría liberarse al interior del citoplasma. Tal fusión se había observado entre algunos virus, pero no estaba claro que el proceso condujera a la infección. Un mecanismo alternativo podría ser que la membrana celular formase una vesícula en torno a la partícula de virus, después de lo cual podría desprenderse de la membrana y transportar la partí-



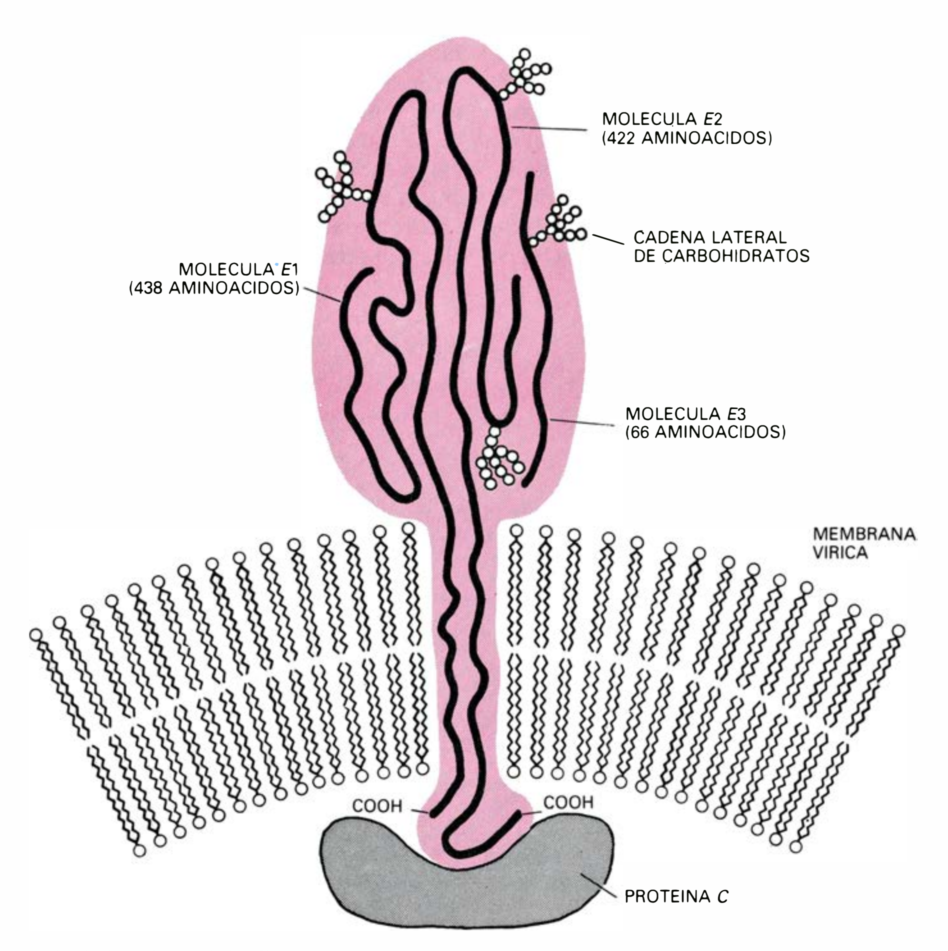

**ESTRUCTURA DE LA PARTICULA del SFV, que es relativamente simple. Mide, aproximadamente, 650 angstrom de diámetro. El ARN contenido en la cápside (no visible en la ilustración) es una cadena de 12.700 nucleótidos; el orden de los nucleótidos proporciona la información genética necesaria para fabricar las proteínas víricas. La cápside consta de 180 moléculas de una proteína denominada proteína *C*. (El ARN y la cápside forman la nucleocápside.) Tiene la cápside forma de poliedro regular de 60 caras, cada una de las cuales es un triángulo equilátero, y en cada triángulo hay tres moléculas de proteína *C*. La membrana vírica externa, que toma del hospedador, está compuesta por dos capas de moléculas lipídicas, cuyas "cabezas" hidrófilas miran al exterior y sus "colas" hidrófobas adentro. Las moléculas lipídicas pueden moverse libremente hacia los lados, confiriendo a la membrana propiedades de un líquido. Insertas en la membrana hay 180 "espinas", formada cada una de ellas por tres clases de moléculas de proteína. Las espinas, que atraviesan totalmente la membrana y están unidas a sendas moléculas de proteína *C* de la cápside, dan a la partícula del SFV un aspecto tachonado (*izquierda*).**

cula al interior del citoplasma. Se sabía de virus que penetraban en las células mediante este proceso, que se denomina endocitosis, pero no se había demostrado que la endocitosis terminara en infección. De hecho, la ruta de entrada del virus de Semliki Forest en la célula animal, que descubrimos en colaboración con Erik Fries, Mark Marsh y Judith White, del EMBL, y Jürgen Kartenbeck, del Centro Alemán de Investigación sobre el Cáncer, presenta características de ambos mecanismos.

Nuestro trabajo ha mostrado, además, que las proteínas de la espina y la membrana del virus no se limitan a proporcionar una cubierta protectora para la nucleocápside; desempeñan un papel crucial en el ingreso de la partícula en el interior del citoplasma. El primer estadio de la entrada es la unión de las glicoproteínas de la espina a la superficie de la célula. Nuestros resultados indican que las glicoproteínas de las espinas del SFV se unen a ciertas glicoproteínas de la membrana celular, entre ellas los antígenos de trasplante (proteínas del sistema inmunitario responsables del reconocimiento de tejidos extraños).

Al exponer una célula animal a las partículas del SFV, éstas se unen preferentemente a la superficie de las microvellosidades, que son proyecciones alargadas que se extienden desde la superficie de la célula. Después de unirse a una microvellosidad, la partícula de virus se desplaza a lo largo de aquella, hacia el centro de la célula. Al cabo de unos pocos minutos, ese movimiento pone a la partícula dentro de un "hueco recubierto", una región especializada de la membrana celular que se aprecia con frecuencia cerca de la base de una microvellosidad. Sobre la faz citoplasmática (interna) de la región hueca y recubierta de la membrana se halla la gruesa cubierta que da nombre a la región. La cubierta consta principalmente de clatrina, una proteína de elevado peso molecular que aisló por primera vez Barbara M. F. Pearse, del Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology de Cambridge, Inglaterra.

Los huecos cubiertos se forman continuamente sobre la superficie de la célula. Una vez constituidos, se repliegan hacia dentro y se desprenden, pasando al citoplasma en forma de "vesículas recubiertas". La clatrina, que se encontraba sobre la superficie interna de la membrana, rodea ahora la vesícula y crea una cáscara poliédrica similar a la cápside del SFV. A medida que la vesícula recubierta se desplaza hacia zonas más internas del citoplasma, pierde, aparentemente, su clatrina y se fusiona con un endosoma, vacuola de gran tamaño dotada de una superficie externa lisa. El propio endosoma, a su vez, se fusiona con un lisosoma, la vacuola degradativa mencionada antes. Ese orgánulo tiene por misión principal degradar sustancias nativas innecesarias para la célula y cuantas hayan penetrado por endocitosis y tengan que degradarse para un ulterior aprovechamiento. De esta acción se encargan varios enzimas digestivos; se ayudan del hecho de que el *p*H del lisosoma es más bajo que el de otras regiones de la célula, lo que es señal de una mayor acidez.

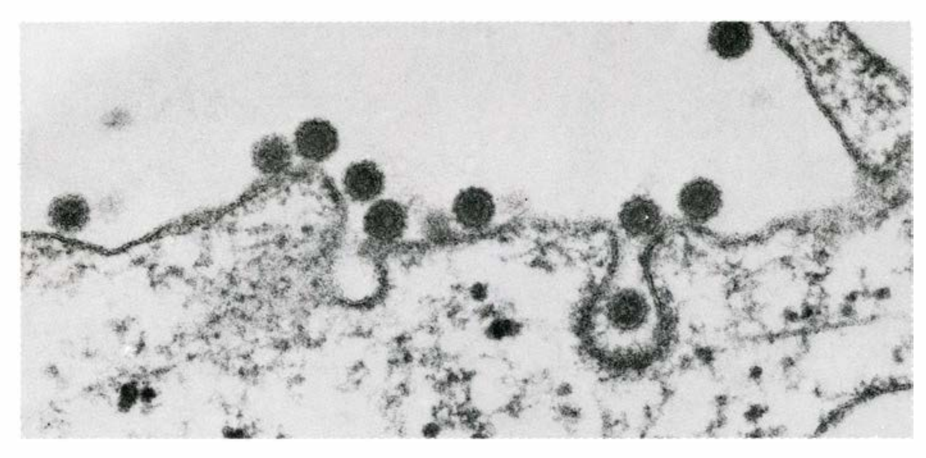


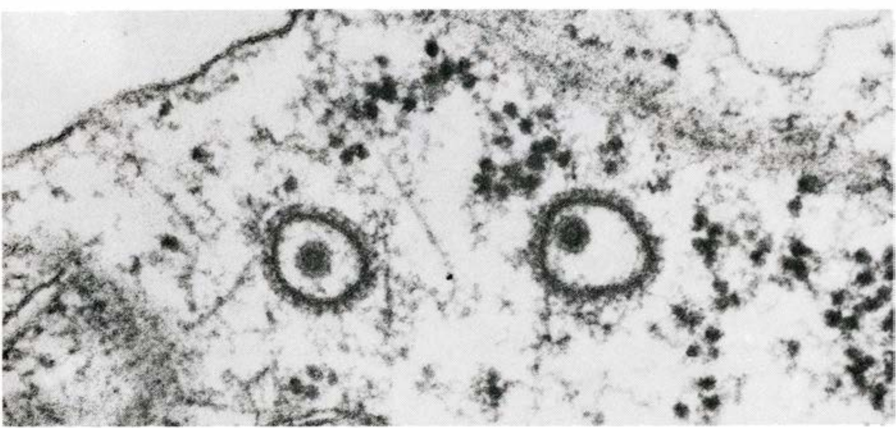

**LA ESPINA DE LA MEMBRANA DEL SFV** está compuesta por tres moléculas de proteína enroscadas entre sí. La molécula designada *E*3, una cadena de 66 aminoácidos, permanece completamente fuera de la membrana vírica. La mayor parte de la *E*1 (de 431 aminoácidos de longitud) y la *E*2 (de 422 aminoácidos de longitud) también quedan fuera de la membrana. Cortos segmentos de *E*1 y *E*2 atraviesan de un lado a otro la membrana. La breve protuberancia que hay sobre el lado interno de la membrana vírica está formada por 31 aminoácidos de la molécula *E*2 y dos aminoácidos de la molécula *E*1. La protuberancia ancla la espina en una molécula de proteína *C* de la cápside. Las tres proteínas de la cápside poseen cadenas laterales hidrocarbonadas; se trata, por tanto, de glicoproteínas. En cuanto a estructura y fabricación, las glicoproteínas de la membrana del SFV son muy similares a las que están embebidas en la membrana de la célula animal, que se desplazan de la matriz lipídica al quedar englobada la partícula.

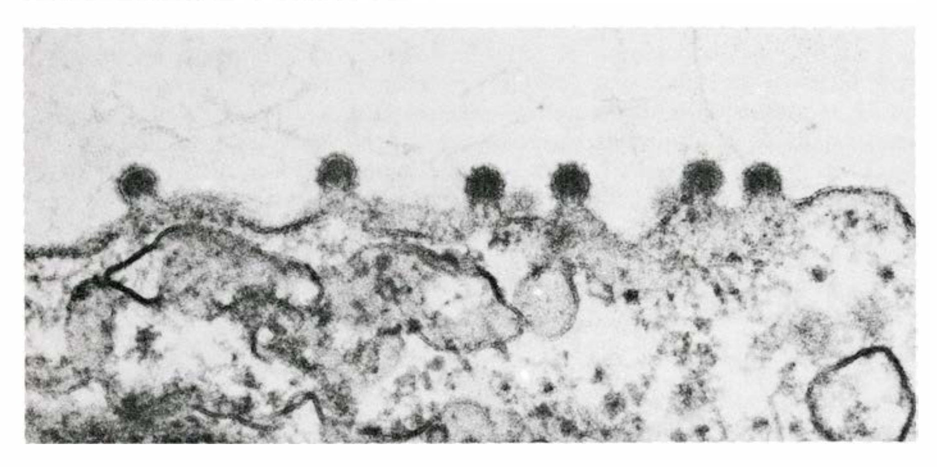
Para entrar en la célula, las partículas de SFV utilizan en su beneficio parte de un importante ciclo celular. Muchas moléculas necesarias para la regulación o la nutrición entran en la célula por endocitosis. Entre las moléculas que logran entrar por ese medio se cuentan lipoproteínas, hormonas polipeptídicas, vitaminas (formando parte de moléculas mayores) y factores de crecimiento. Muchas de estas moléculas acaban en el lisosoma. La más estudiada es la lipoproteína del suero de baja densidad, principal transportadora del colesterol en la sangre. Richard G. W. Anderson, Michael S. Brown y Joseph L. Goldstein, del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en Dallas, han probado que la lipoproteína penetra en la célula a través del hueco recubierto y que se degrada en el lisosoma; posteriormente, el colesterol se utiliza en el ensamblaje de nuevas membranas celulares.

Las células animales muestran una gran capacidad para tomar partículas de virus por endocitosis; una célula de riñón de hámster toma hasta 3000 partículas por minuto. El promedio de partículas presentes en las células que contienen alguna es de 1,3 unidades; por tanto, en la superficie de la célula de-

ben formarse al menos 2300 vesículas recubiertas cada minuto. La capacidad de este sistema para transportar sustancias hasta el interior celular es tan grande que la célula necesita algún mecanismo para devolver a la superficie de la célula los componentes de la membrana que constituyen la vesícula recubierta; de otra forma, la membrana se agotaría. Se ha demostrado que la endocitosis y el retorno de los componentes de la membrana a la superficie forman un ciclo en continua operación; al entrar en la célula, el virus no hace sino aprovecharse del primer tramo del ciclo, que termina en el lisosoma.





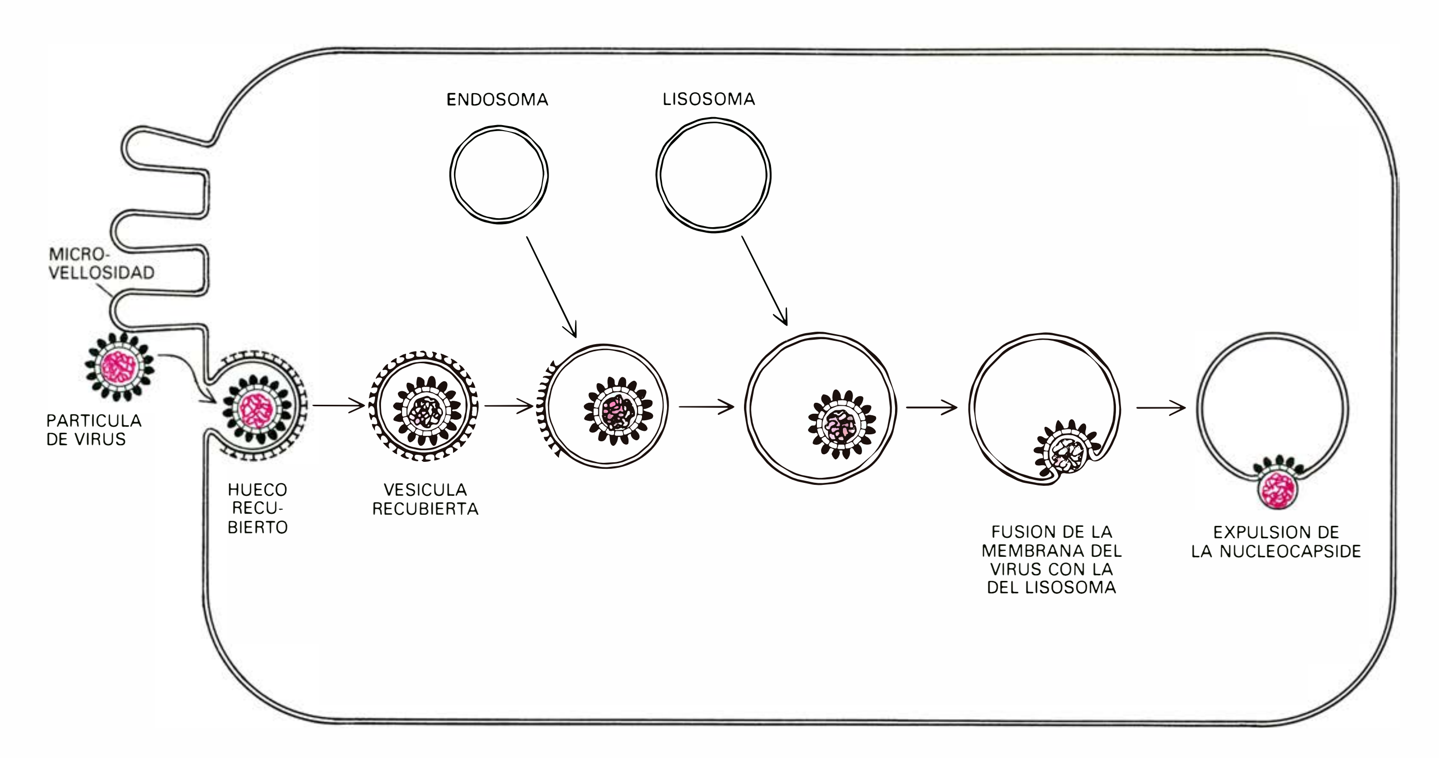


**PRIMER Y ULTIMO ESTADIOS de la infección de una célula animal por el virus Semliki Forest, recogidos en estas micrografías electrónicas tomadas en el laboratorio de los autores y en el de Jürgen Kartenbeck. El primer estadio de la entrada es la fijación de la partícula a la membrana de la célula (*fotografía superior*). Las propias proteínas de la espina vírica se unen a receptores proteicos situados en la membrana de la célula. Los receptores son moléculas de proteína cuya configuración les permite unirse a un número limitado de proteínas. La partícula de virus tiende a unirse a una microvellosidad, una proyección digitiforme de la superficie de la célula (*a la derecha, en la microfotografía superior*). Desde allí, la partícula se desplaza al interior de un "hueco recubierto", así llamado debido a la gruesa cubierta de proteína que hay sobre una superficie interna. El hueco recubierto se desprende, rodeando a la partícula y formando una "vesícula recubierta"; la vesícula transporta la partícula hasta el interior del citoplasma celular (*micrografía central*). Una vez se ha replicado la partícula, los nuevos virus creados abandonan la célula hospedadora por gemación hacia fuera de la membrana celular (*micrografía inferior*).**

¿Cómo escapa el SFV de la acción destructora de los enzimas que hay en el lisosoma? Que los virus animales que entran en la célula por medio de la endocitosis se transferían al lisosoma era cosa conocida desde hacía algún tiempo. Se creía, sin embargo, que el proceso finalizaba con la destrucción de las partículas víricas, y no con la infección. La primera prueba de que no era así se obtuvo de experimentos en los que se emplearon ciertos inhibidores del lisosoma: sustancias débilmente alcalinas y solubles en lípidos, cuando no estaban cargadas eléctricamente. En su forma sin carga, los inhibidores podían atravesar la membrana externa del lisosoma. Una vez dentro, las moléculas adquirían carga eléctrica como resultado de la acidez del interior vacuolar. Al cargarse, las moléculas del inhibidor no podían salir por la membrana del lisosoma, y se acumulaban en éste, rebajando su acidez e inhibiéndolo.

Hemos observado que la aplicación de tales inhibidores de los lisosomas a células animales interrumpe el proceso mediante el cual la nucleocápside se libera al interior del citoplasma de la célula hospedadora. Los inhibidores no afectan a la unión de la partícula de SFV con la membrana de la célula, ni al movimiento del virus hacia el interior del lisosoma. Sin embargo, evitan que la nucleocápside pase del lisosoma al citoplasma. Trabajos posteriores, realizados en nuestro laboratorio, han demostrado que los inhibidores interfieren con la fusión de las membranas del virus y del lisosoma. En ausencia de los inhibidores, la fusión de las membranas permite el paso de la partícula a través del lisosoma hasta el citoplasma.

Según todos los indicios, la reacción de fusión viene desencadenada por la acidez del interior del lisosoma. Cuando rebajamos el *p*H de una preparación de partículas de SFV y trozos de membrana lipídica libre hasta un nivel similar al del lisosoma, la membrana del SFV se fusionaba instantáneamente con otras membranas, permitiendo que la nucleocápside las atravesara. En una ampliación de este trabajo se prepararon vesículas sintéticas de lípidos similares a los de la membrana del lisosoma. Se introducía luego en las vesículas ribonucleasa, un enzima que degrada moléculas de ARN. Cuando se mezclaban las vesículas con partículas del virus y se rebajaba el *p*H de la solución, la membrana del virus se fusionaba con la de la vesícula. Las micrografías electrónicas que sacamos nos revelaron que




**ENTRADA DEL VIRUS SEMLIKI FOREST en la célula animal. Para que tal acontezca, se requiere que la partícula de virus atraviese varias vacuolas. La vesícula recubierta está envuelta por la proteína clatrina, que forma una cáscara en torno a la partícula, de estructura similar a la de la cápside que hay en torno al ARN. Dentro de la célula, la vesícula pierde su cubierta de clatrina y se fusiona con una gran vacuola de superficie lisa, llamada endosoma. Muchas moléculas implicadas en el metabolismo normal de la célula se introducen en la célula mediante este proceso, denominado endocitosis. El endosoma se une a la vacuola denominada lisosoma. El lisosoma contiene enzimas degradativos que digieren las sustancias que penetran en las células; muchas de las sustancias adquieren así una forma utilizable por la célula. El interior del lisosoma es más ácido que otras regiones celulares. Aunque se sabe desde hace tiempo que las partículas de virus pueden introducirse en la célula por este camino, se suponía que las partículas eran degradadas por los enzimas del lisosoma antes de que pudieran alcanzar el citoplasma e iniciar allí la infección. Pero sabemos ya que la acidez del lisosoma provoca la fusión de la membrana externa del virus con la membrana del lisosoma, lo que permite la liberación de la nucleocápside al citoplasma. Se trata de la primera vez que se ha seguido la trayectoria de un virus en su camino al interior de una célula animal, hasta el momento de comenzar la infección. El hallazgo puede resultar significativo, si se llega a demostrar que otros virus animales, como parece ocurrir con el de la gripe, inician la infección de idéntica manera.**

las vesículas estaban recubiertas por las proteínas de las espinas del virus; las nucleocápsides se encontraban dentro de las vesículas y la ribonucleasa degradaba el ARN del virus.

En la célula intacta, la partícula vírica utiliza este procedimiento para salir del lisosoma. Parece que la acidez del interior del lisosoma induce un cambio en la membrana del virus que le permite fusionarse con la membrana del lisosoma. El proceso se desarrolla con tanta rapidez que la nucleocápside sale expulsada al citoplasma de la célula sin haber sido destruida por los enzimas degradativos del lisosoma.

No se conoce el mecanismo exacto mediante el cual se induce la fusión. Sospechamos que en ello tiene mucho que ver la proteína *E*1 de la espina de la membrana del virus. La molécula de *E*1 posee un segmento hidrófobo, formado por 16 aminoácidos, en la parte de la proteína que queda fuera de la membrana del virus. Si el medio circundante es ácido, el segmento hidrófobo puede quedar expuesto y reaccionar con la membrana del lisosoma, llevando las membranas a una estrecha superposición y permitiendo su fusión.

El trabajo realizado con el virus de Semliki Forest traza, por primera vez, la ruta de un virus hacia el interior de una célula animal hasta que la nucleocápside se libera en el citoplasma. El significado del hallazgo quedará realzado si se demuestra que el mecanismo es general entre los virus animales. Los recientes trabajos realizados con Karl Matlin y Hubert Reggio, del EMBL, indican que los virus de la gripe y el de la estomatitis vesicular (que está relacionado con el virus que causa la rabia) siguen la misma ruta. Ambos virus, al igual que el de Semliki Forest, poseen una membrana externa con proteínas insertadas dentro. Algunas toxinas bacterianas pueden penetrar también en el citoplasma de la célula por la vía del lisosoma.

El lisosoma puede convertirse en un punto vulnerable de la célula animal ante el acoso de muchos patógenos. Las investigaciones sobre la relación entre los virus y los lisosomas comportan, en consecuencia, importantes implicaciones clínicas. Las drogas de las que se dispone corrientemente para tratar las infecciones por virus son de eficacia limitada y, con frecuencia, presentan efectos colaterales no deseables. Una droga que interfiriera la fusión de la membrana del virus con la membrana del lisosoma podría convertirse en un eficaz agente antivírico.

La liberación de la nucleocápside a partir del lisosoma completa la primera fase de la infección. La segunda fase comprende la replicación del ARN vírico, la fabricación y modificación de las proteínas víricas y el ensamblaje de la nueva nucleocápside. Estos procesos dependen, en gran parte, de la maquinaria de síntesis de proteína contenida en la célula hospedadora: los ribosomas (los pequeños orgánulos esféricos en los que se sintetizan las proteínas) y múltiples enzimas y otras moléculas. Para que se inicie la replicación del ARN vírico, el ácido nucleico debe liberarse de la cápside. Después de ello se traducen varias proteínas del primer segmento del ARN vírico. Una de ellas es un enzima denominado ARN polimerasa dependiente de ARN. La ARN polimerasa cataliza la duplicación del ARN. Debe estar codificada en el material genético del virus, porque la célula hospedadora carece de dicho enzima. Ni la liberación del ácido nucleico,

ni la fabricación del enzima se conocen todavía plenamente.

Con el ácido nucleico ya liberado, y las moléculas de la polimerasa reunidas en el citoplasma, se inicia la replicación. Se fabrican, en gran cantidad, dos clases de moléculas de ARN. Es la primera una copia de la molécula completa del ácido nucleico vírico, con una longitud de 12.700 nucleótidos. Se le designa ARN 42*S*. (*S* simboliza la unidad Svedberg, una medida de la masa de una molécula.) Las moléculas 42*S* que se van acumulando sirven de base para la fabricación de más ARN polimerasa. En última instancia se incorporarán al interior de las nucleocápsides recién fabricadas.

La segunda clase de ARN es una copia del último tercio de la molécula total del ARN vírico, que se inicia después del segmento que codifica la ARN polimerasa. La molécula más corta, de 4170 nucleótidos, es el ARN 26*S*. Incorpora éste la información genética que se necesita para la síntesis de las cuatro proteínas víricas. Las secuencias que codifican las cuatro proteínas están dispuestas sobre la cadena 26*S* en el orden *C*, *E*3, *E*2 y *E*1. Al cabo de cuatro horas de haberse añadido el virus a una célula animal, las dos formas del ARN vírico suponen la mayor parte de moléculas de ARN mensajero que hay en la célula. La célula se ha convertido en una cadena de montaje para la fabricación de nuevas partículas de virus.

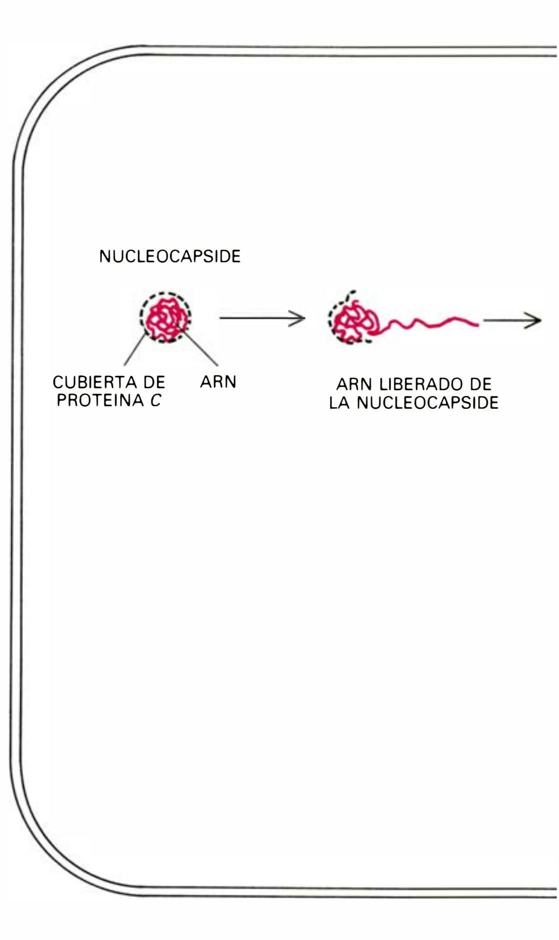
La síntesis de la cápside vírica y de las proteínas de las espinas se inicia cuando el ARN 26*S* se fija a un ribosoma. Las cuatro proteínas estructurales se traducen consecutivamente a partir del ARN 26*S*. La traducción comienza en el codón de "iniciación", un triplete de nucleótidos que precede a la secuencia que codifica para la proteína *C*. El proceso continúa sin interrupción, hasta que se llega al codón de "parada" que hay al final del segmento que codifica para la proteína *E*1. El segmento de ácido nucleico vírico que va desde el codón de iniciación hasta el codón de parada comprende 3760 nucleótidos.

En la célula viva, las cuatro proteínas víricas no se liberan del ribosoma al citoplasma formando una única cadena. La nueva proteína *C*, la primera que se traduce, se encuentra en el citoplasma. La proteína *E*1 y una proteína intermedia, conocida como *p*62, formada por las proteínas *E*2 y *E*3 enlazadas entre sí, se insieren en la membrana del retículo endoplasmático: una red de membranas interconectadas que desempeña el papel central en la síntesis y modificación de las proteínas de la célula hospedadora, incluidas las proteínas de la membrana y las proteínas de secreción (proteínas que segrega la célula). La fabricación de las proteínas de la membrana del virus es, por tanto, casi idéntica a la de las proteínas de la membrana de la célula hospedadora.

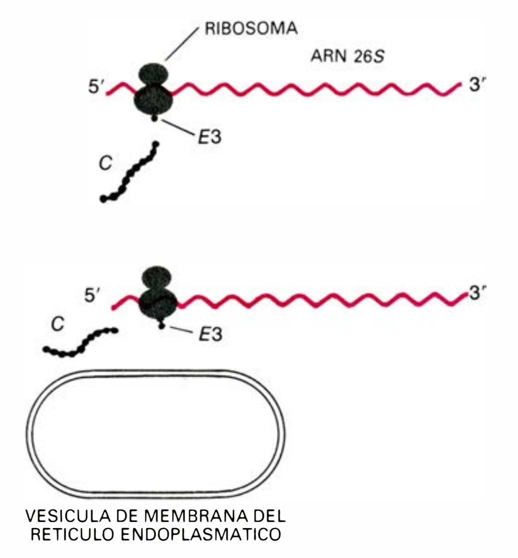
Se sabe ya bastante sobre la estructura de las proteínas de la membrana de las células animales y sobre cómo se construyen estas moléculas. Muchas de las glicoproteínas de la célula poseen un grupo distintivo de 20 a 30 aminoácidos, en el extremo de la cadena de proteína, conocido como el extremo amino terminal; el extremo amino terminal es la primera parte de la cadena que se fabrica sobre el ribosoma. Este segmento, la "secuencia señal", tiene una especial afinidad por un punto específico de la superficie de la membrana del retículo endoplasmático. En cuanto un ribosoma que se mueve libremente por el citoplasma traduce los 20 o 30 aminoácidos, el ribosoma se fija al retículo endoplasmático. El ribosoma fijo continúa con la traducción del ARN mensajero (ARN que transmite la información del ADN de la célula a sus ribosomas). Sin embargo, la cadena de aminoácidos en crecimiento no se queda en el citoplasma. Traspasa la membrana del retículo endoplasmático y se extiende por el interior del mismo.

Mediante una prueba de ensayo desarrollada por Günter Blobel y Bernhard Dobberstein, de la Universidad Rockefeller, hemos demostrado que este mismo proceso está implicado en la síntesis de las proteínas de la membrana del virus de Semliki Forest. Trabajamos con un sistema libre de células que contenía ribosomas, enzimas, ARN de transferencia, aminoácidos y otras sustancias necesarias para la síntesis proteica. Sin retículo endoplasmático, el sistema no era capaz de fabricar correctamente las proteínas de las espinas del virus. Pero si añadíamos vesículas de retículo endoplasmático, las proteínas de las espinas se sintetizaban exactamente como lo hacen en las células infectadas con el virus. Se fabricaron tres proteínas: *C*, *E*1 y *p*62. Todavía más: las cadenas de aminoácidos se encontraban en los lugares idóneos. La proteína *C* estaba fuera de las vesículas, en la región correspondiente al citoplasma en la célula intacta. Las cadenas *E*1 y *p*62, sin embargo, estaban insertas dentro de la membrana de la vesícula.

Estos y otros experimentos han permitido saber que inmediatamente des-



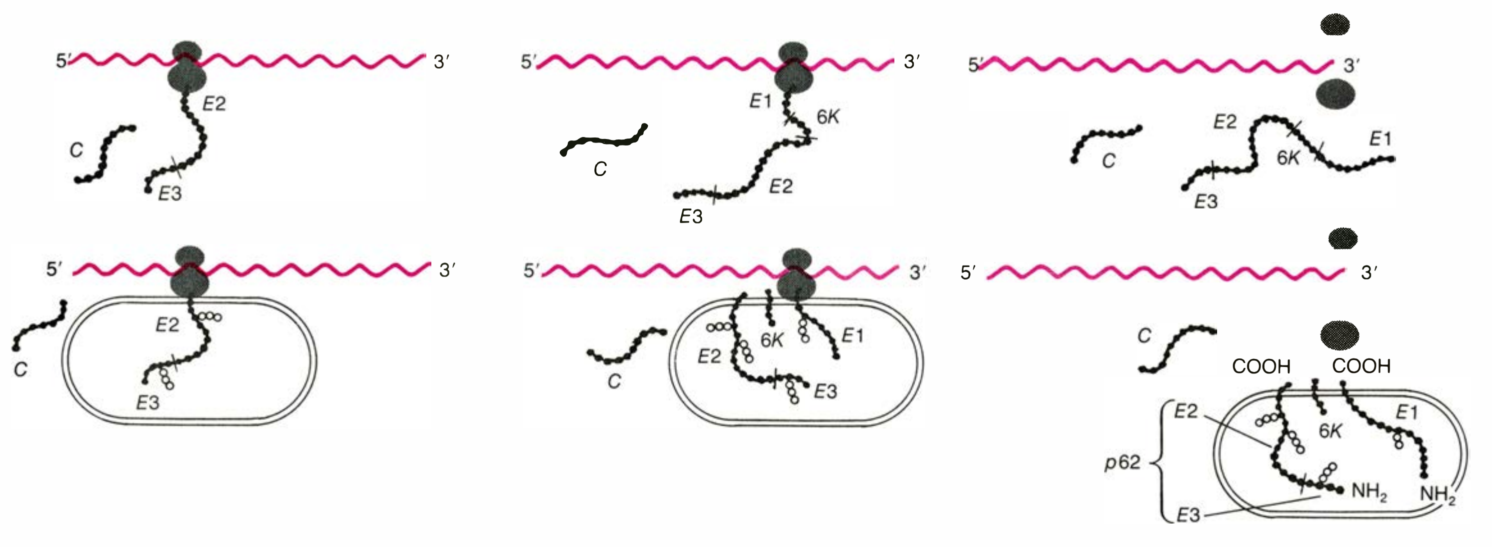

**FABRICACION DE LOS COMPONENTES** de las partículas del SFV. Se utiliza el aparato de la célula para sintetizar proteínas. Después de la liberación de la nucleocápside del lisosoma, se inicia la replicación. El ARN vírico pierde su cáscara de proteína; inmediatamente después, se fabrica una ARN polimerasa específica del virus. (La ARN polimerasa es el enzima que cataliza la replicación del ARN.) La polimerasa y el ARN se combinan para fabricar dos clases de nuevas moléculas de ARN




**EL RETICULO ENDOPLASMATICO** desempeña un papel significativo en la síntesis de las proteínas de las espinas del SFV. Si se colocan moléculas de ARN 26*S* en una solución que contenga ribosomas, enzimas y otras sustancias requeridas para la síntesis de proteínas, se forman dos cadenas de aminoácidos: la molécula de proteína *C* y una larga cadena que contiene moléculas *E*3, *E*2 y *E*1. No es este el camino que sigue la formación de las proteínas de las espinas en la célula hospedadora. Sin

ARN VIRICO
INFORMACION PARA PROTEINAS NO ESTRUCTURALES
INFORMACION PARA PROTEINAS ESTRUCTURALES
5′ 3′
PROTEINAS NO ESTRUCTURALES (INCLUIDA LA POLIMERASA)
REPLICACION
COPIAS DE ARN
ARN 42*S*
5′ 3′
ARN 26*S*
5′ 3′
NUEVAS NUCLEOCAPSIDES
RIBOSOMA
PROTEINA *C*
RETICULO ENDOPLASMATICO
ESPINAS
PROTEINA DE LA ESPINA
APARATO DE GOLGI
GEMACION
NUEVAS PARTICULAS DE VIRUS
ESPINAS

**vírico. El ARN 42*S* es una copia de la molécula completa del ARN vírico; el ARN 26*S*, una molécula más corta, lleva incorporada la secuencia genética para las cuatro proteínas del virus. (*S* significa unidad Svedberg, una medida de la masa de la molécula.) Tres o cuatro horas después, observamos que éstas son las moléculas de ARN más abundantes en la célula. A continuación el ARN 26*S* se une a un ribosoma y hace las veces de ARN mensajero para las proteínas víricas. Las cuatro proteínas se van fabricando de manera continua, en el orden *C*, *E*3, *E*2 y *E*1. Producida la proteína *C*, se desprende gracias a la acción de un enzima. En el citoplasma, se enlaza a una molécula de ARN 42*S* para formar una nueva nucleocápside. Seguidamente se fabrica la proteína *E*3. Cuando se han ensamblado los primeros aminoácidos de la cadena de *E*3, el ribosoma se fija al retículo endoplasmático, una red de membranas interconectadas que hay dentro de la célula. La cadena *E*3 en crecimiento se hace pasar a través de la membrana del retículo endoplasmático; el ensamblaje continúa y la cadena se va extendiendo por el interior del retículo. Cuando se han fabricado las tres moléculas de proteína de las espinas, se combinan para dar lugar a una espina de la membrana. Luego se transportan al orgánulo denominado aparato de Golgi, donde sufren modificación. La espina se inserta en la membrana de la célula, y aquí halla una nueva nucleocápside. Por último, la partícula, ya terminada, deja la célula por gemación.**




**embargo, cuando se añaden a la solución vesículas obtenidas a partir de membranas del retículo endoplasmático, las proteínas víricas se fabrican de la misma manera que se producen en la célula. Primero se sintetiza la proteína *C*, que se desprende de la cadena. Los primeros aminoácidos de la cadena *E*3 constituyen una "secuencia señal" que une el ribosoma a la vesícula. La traducción prosigue con la cadena de *E*3 atravesando la membrana. Las moléculas de *E*3 y *E*2 se van fabricando consecutivamente y permanecen conectadas a una proteína denominada *p*62. La traducción cursa hasta que se llega a un punto cercano al extremo de la cadena *p*62. Allí, un segmento de aminoácidos hidrófobos impide que la cadena cruce la membrana; la cadena permanece fija a la membrana, mientras continúa la traducción. Concluida la traducción de *p*62, se desprende la cadena *p*62 y empieza a fabricarse la molécula *E*1. La cadena *E*1 tiene su propia secuencia señal, 6*K*, que se desprenderá luego. El ensamblaje de la molécula *E*1 sigue hasta que su paso a través de la membrana se ve obstruido por un segmento hidrófobo. De esta forma, la proteína *C* se encuentra, al final, fuera de la vesícula, en la región correspondiente al citoplasma; la mayor parte de las cadenas *p*62 y *E*1 están dentro de la vesícula, en la región correspondiente al interior del retículo endoplasmático. Cuando las proteínas se fabrican en la célula, la cadena *p*62 se fracciona en las cadenas *E*2 y *E*3. Finalmente, las tres proteínas se ensamblan para constituir la espina.**

pués de traducirse la proteína *C* en la célula intacta, una proteasa, enzima que corta proteínas, la separa de la cadena en crecimiento. La rotura de la proteína *C* expone una secuencia señal en el extremo de la cadena *p*62. La secuencia señal, a su vez, une el ribosoma al retículo endoplasmático e inicia así la inserción de la cadena de proteína a través de la membrana. ¿Qué ocurre después? Casi toda la cadena de *p*62 se traduce a partir del ácido nucleico vírico y pasa al interior del retículo endoplasmático. Aparentemente, el grupo de aminoácidos hidrófobos próximos a la cola de la cadena (cerca del extremo de la molécula *E*2) detienen su movimiento a través de la membrana. Este grupo no puede atravesar la membrana lipídica hidrófoba y ancla la cadena de proteína en el retículo endoplasmático. Finalizada la traducción de *p*62, la cadena se fija a la membrana; 31 aminoácidos se despliegan hacia el citoplasma y el resto de la cadena por el interior del retículo endoplasmático.

La proteína *E*1 se sintetiza a continuación. Parece poseer su propia secuencia señal, codificada por un segmento del ARN vírico localizado entre los fragmentos que corresponden a las proteínas *E*1 y *E*2. La secuencia señal, de 60 aminoácidos de longitud, se designa como 6*K*. Dos cortes catalizados enzimáticamente la liberan de la cadena *E*1 en crecimiento cuando la cadena está ya unida a la membrana del retículo endoplasmático. El paso de la proteína *E*1 a través de la membrana, como el de la proteína *p*62, queda detenido por una secuencia de aminoácidos hidrófobos próximos al extremo de la cadena. La cadena permanece fija al retículo endoplasmático, con un pequeño segmento que se extiende hacia el interior del citoplasma. La traducción de la proteína *E*1, sin embargo, es el proceso peor conocido de los que comprende la síntesis proteica del virus.

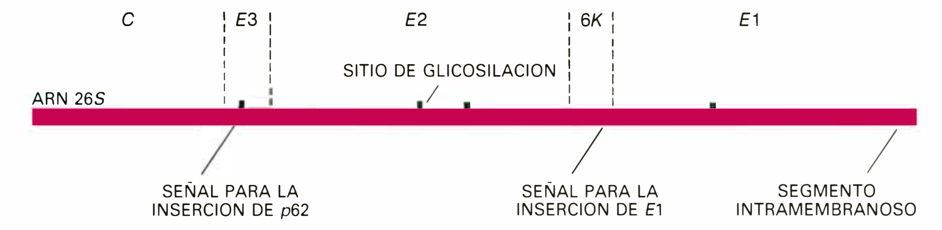
Las cadenas laterales hidrocarbonadas de las glicoproteínas del virus se unen en el transcurso de la traducción; posteriormente sufrirán una modificación química. El mismo proceso opera en la síntesis de algunas de las glicoproteínas propias de la célula. De hecho, la traducción de las proteínas víricas no se apoya en mecanismos únicos. La única característica inusual del proceso es la localización de las secuencias señal que inician la fijación del ribosoma al retículo endoplasmático. En la mayoría de las glicoproteínas de la célula animal cuya síntesis se ha examinado cuidadosamente, la secuencia señal está codificada por nucleótidos que siguen inmediatamente al codón de iniciación; las secuencias señal de las proteínas *E*1 y *p*62 del virus están codificadas por nucleótidos situados en el interior de la cadena de ARN mensajero. Sin embargo, el número de moléculas de ARN mensajero que se han caracterizado completamente no es lo bastante grande para excluir la posibilidad de que algunas de ellas puedan incluir también regiones que codifiquen secuencias señal.

La dependencia del virus respecto de los procesos normales de la célula continúa mientras las proteínas de las espinas se modifican, son transportadas y se insertan en la membrana de la célula. Poco después de su fabricación, las proteínas *E*1 y *p*62 se unen entre sí en la membrana del retículo endoplasmático. El complejo que forman es transportado a la superficie de la célula, siguiendo la misma ruta que siguen las proteínas de secreción y algunas proteínas de la membrana: desde el retículo endoplasmático, las proteínas de las espinas se trasladan al aparato de Golgi, un orgánulo complejo con varios espacios interiores encerrados por membranas. En el aparato de Golgi se modifican las cadenas laterales hidrocarbonadas. Michael F. G. Schmidt y Milton J. Schlesinger, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, han mostrado que en el aparato de Golgi se unen a cada proteína moléculas con largas cadenas laterales hidrófobas. Se sabe que tales moléculas se unen a las glicoproteínas de la membrana celular y a las proteínas de la membrana de otros virus, pero todavía no se conoce el significado de la modificación.

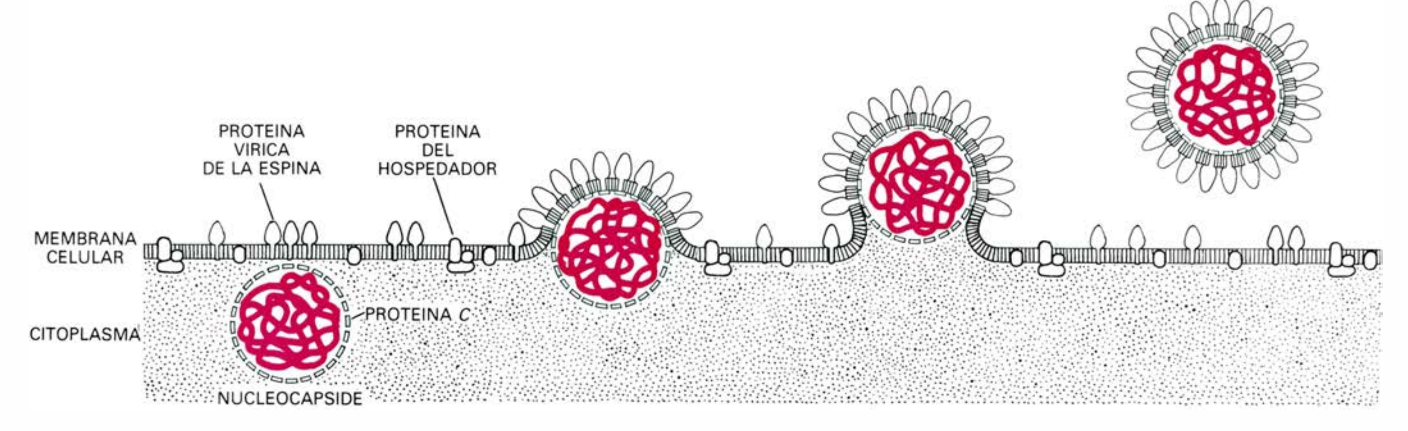
En su paso a través del aparato de Golgi, el complejo formado por las proteínas *E*1 y *p*62 conserva una única orientación, que en cierto sentido es la inversa de la que tendrá en la membrana del virus. El segmento que formará la espina que se proyectará hacia el exterior de la membrana del virus se coloca en el compartimento interno del aparato del Golgi; el segmento que atravesará la membrana vírica se inserta en las membranas del aparato; los cortos segmentos de las moléculas de proteína que quedarán unidos a la cápside se proyectan fuera del aparato, hacia el citoplasma.

Una vez atravesado el aparato de Golgi, las glicoproteínas son transportadas a la superficie de la célula hospedadora y se insertan en la membrana; apenas si sabemos cómo se realiza este movimiento de entrada y salida de los orgánulos. La rotura de la proteína *p*62 para dar cadenas *E*2 y *E*3 tiene lugar aproximadamente en el momento en que el complejo llega a la superficie de la célula. La rotura la realiza una proteasa. Muchas proteínas de secreción, hormonas y proteínas de la sangre incluidas, alcanzan su forma final de manera semejante.

Para cuando el complejo de glicoproteínas de la espina se ha insertado en la membrana de la célula, la nucleocápside ya se ha ensamblado en el citoplasma a partir de proteína *C* y ácido nucleico. Puede entonces iniciarse la fase final del tránsito del virus Semliki Forest a través de la célula animal, es decir, la formación de la partícula completa de virus y su liberación de la célula. Nicholas H. Acheson e Igor Tamm, de la Universidad Rockefeller, demostraron por primera vez que la partícula del SFV se ensamblaba y liberaba mediante un proceso de gemación, hacia el exterior, de la membrana celular. Un trozo de la membrana envuelve a la nucleocápside y la yema se desprende de la célula. La mayoría de los virus que




**MOLECULA DE ARN 26*S*, portadora de la información genética necesaria para fabricar las cuatro proteínas del virus. La molécula de ARN proporciona la información que instruye al ribosoma acerca de cuáles son los aminoácidos que debe añadir a la cadena en fase de crecimiento. Los sitios de glicosilación representan los puntos de la proteína donde deben fijarse las cadenas laterales de carbohidrato. La secuencia señal reconoce el lugar del retículo endoplasmático donde se fija el ribosoma. Muchas moléculas de ARN mensajero de las células animales poseen regiones que codifican secuencias señales. Sin embargo, en los ARN que se han examinado en detalle, estas regiones se encuentran en el extremo de la molécula de ARN, y no en el centro, como las secuencias *E*3 y 6*K*. Son pocos los ARN mensajeros que se han estudiado con detalle suficiente para determinar su secuencia genética completa; quizás algunos contengan regiones internas que codifican secuencias señales, como ocurre en el ARN vírico. Aparte de esa posible anomalía, la síntesis de las proteínas víricas sigue con precisión la pauta de síntesis de muchas proteínas celulares.**




**SALIDA DE LA PARTICULA DEL SFV de la célula. Se logra mediante la gemación, hacia el exterior, de la membrana. El proceso comienza cuando una nueva nucleocápside se sitúa justo por debajo de la membrana. Una proteína *C* se une a la corta protuberancia de la espina de la membrana, anclando la nucleocápside en la membrana; se van formando enlaces entre otras moléculas de proteína *C* y espinas. Las espinas pueden moverse libremente en la membrana celular y parecen tener mayor afinidad química por la proteína *C* que las proteínas propias de la célula, de ahí que se vayan apartando de la nucleocápside las proteínas de la célula. Mientras continúan las uniones, la membrana de la célula se curva en torno a la nucleocápside. Una vez que las 180 moléculas de proteína *C* se hallan unidas a espinas, la membrana rodea toda la nucleocápside y se desprende del resto. De esta manera, la partícula de virus se libera y pasa al espacio intercelular, renovando el proceso de infección. El mecanismo de salida explica por qué las moléculas lipídicas de la membrana del virus son de las mismas clases que las de la membrana plasmática de la célula hospedadora y las proteínas del SFV son específicas del virus.**

tienen membranas, los virus de la gripe, el virus del sarampión y el virus de la rabia incluidos, también salen de la célula hospedadora por gemación.

La clave para entender el ensamblaje final del virus de Semliki Forest se consiguió cuando observamos que las proteínas víricas cruzaban la membrana celular y se proyectaban hacia el citoplasma. Las proteínas de las espinas mostraban la misma orientación que habrían de adoptar en la membrana vírica: la espina proyectándose hacia fuera y las cortas protuberancias de proteínas *E*1 y *E*2 extendiéndose hacia dentro de la célula. Nuestro trabajo sugiere que la fuerza que conduce la gemación proviene de la interacción de las protuberancias con la proteína *C*.

La gemación se inicia cuando la nucleocápside difunde desde el sitio del citoplasma en el que se formó hacia un punto situado justo debajo de la membrana celular. Según nuestra hipótesis, una molécula de proteína *C* se une a las protuberancias de una sola espina. La unión entre las protuberancias y la proteína *C* ancla la nucleocápside a la membrana. La nucleocápside sirve entonces de punto de fijación para más espinas. Debido al carácter de fluido bidimensional de la membrana celular, tanto las glicoproteínas del virus como las glicoproteínas de la célula pueden moverse libremente hacia los lados. Cuando una espina transita sobre el lugar en el que está anclada la nucleocápside, se une a una proteína *C* vacante. A medida que se van formando más enlaces entre las proteínas de las espinas y las proteínas *C*, la membrana de la célula se ve forzada a curvarse en torno a la nucleocápside. Cuando las 180 moléculas de la cápside están unidas a espinas, la membrana envuelve por completo a la nucleocápside. Luego, el fragmento de membrana se separa del resto y se libera una partícula de virus al espacio intercelular. En la membrana no queda ningún agujero tras el paso por ella de la partícula, toda vez que los lípidos de la membrana lo cierran espontáneamente.

El mecanismo que hemos propuesto proporciona una explicación verosímil al hecho de que los lípidos que componen la membrana del virus sean los mismos que los de la membrana de la célula hospedadora. No está tan clara la razón de la ausencia de glicoproteínas de la célula hospedadora en la membrana del virus. Quizá las proteínas del hospedador sean empujadas desde el sitio de gemación, pues su afinidad química por las proteínas *C* es menor que la de las glicoproteínas del virus.

A las pocas horas de la entrada del virus de Semliki Forest en una célula, las nuevas partículas formadas empiezan a salir por gemación de la membrana celular. Una vez en el espacio intercelular, las partículas avanzan hacia otras células y dispersan la infección. Cuando se considera el ciclo del virus desde la entrada hasta la salida, resulta notable la escasez de mecanismos únicos del propio virus. La unión de la partícula a la superficie de la célula y la fusión de su membrana con la membrana del lisosoma dependen de las proteínas de la membrana del virus; una ARN polimerasa específica del virus cataliza la replicación del ácido nucleico vírico; la salida de la célula requiere la interacción de las proteínas víricas de las espinas con la proteína *C* vírica.

Para el resto del proceso, el virus se aprovecha de los mecanismos normales de la célula animal. Se introduce en ésta por una ruta que siguen muchas macromoléculas necesarias para el metabolismo. El paso desde el ribosoma hasta el retículo endoplasmático, el aparato de Golgi y la membrana celular es el que realizan numerosas proteínas celulares. La fabricación de las moléculas de ARN vírico y de las cuatro proteínas estructurales del virus utiliza el aparato de síntesis de proteína que está operando normalmente en la célula.

La fuerte dependencia de los virus, entre ellos el Semliki Forest, de las funciones normales de la célula hospedadora sugiere cuál sea la razón por la que los agentes antivíricos resultaron menos eficaces que los agentes antibacterianos: es difícil preparar una droga que interfiera con la replicación del virus sin que simultáneamente dañe a la célula hospedadora. El trabajo encaminado a buscar agentes antivíricos útiles deberá probablemente tener como meta la interrupción de las pocas funciones específicas del virus. Por otra parte, de la fuerte dependencia del virus respecto de las funciones normales de la célula se deduce que el trabajo realizado con virus no sólo beneficiará a la práctica clínica, sino que, a la vez, proporcionará un conocimiento más profundo de la vida de la célula animal.

# Ciencia y sociedad

## *Nobel de química a la química orgánica física*

Roald Hoffmann nació en 1937 en la pequeña ciudad polaca, hoy soviética, de Zloczow, que sería ocupada por las tropas nazis. De los doce mil judíos residentes en Zloczow antes de la invasión, sólo quedaron ochenta. El pequeño Roald y sus padres lograron escapar del campo de trabajos forzados en donde estaban internados, y una familia ucraniana les escondió hasta el final de la guerra en una buhardilla disimulada; en ella, a la débil luz entrante por el hueco de un ladrillo, aprendió a leer.

Después de tres años de vicisitudes, a la edad de once, llegó a los Estados Unidos, adquiriendo en 1955 la ciudadanía americana e iniciando sus estudios en el Columbia College neoyorquino. En virtud de sus extraordinarias dotes intelectuales, fue seleccionado en la campaña Westinghouse Science Talent Search para emplear sus vacaciones veraniegas investigando junto a E. S. Newman y R. E. Ferguson, ambos del National Bureau of Standars, y con J. B. Cumming, del Brookhaven National Laboratory.

Con experiencia en termoquímica, pirolisis de hidrocarburos y reacciones nucleares del carbono, a los veintiún años obtuvo el título de "bachelor of arts" (BA), continuando sus estudios superiores en la Universidad de Harvard, donde se doctoró en física y química física, respectivamente, con una tesis acerca de orbitales moleculares de moléculas poliédricas y de estados excitados de polímeros helicoidales, realizada bajo la dirección conjunta de M. Gouterman y W. N. Lipscomb (Nobel de química 1976). Durante el curso 1960-61 trabajó con A. S. Davydov, en la Universidad de Moscú. En su primera vuelta a Europa para asistir a un curso de verano celebrado en Suecia, cerca de Estocolmo, conoció a su futura mujer, Eva Börjesson, de la que tiene dos hijos.

En Harvard, durante el período 1962-1965, Hoffmann desarrolló un método semiempírico para el cálculo de estructuras moleculares, pasando luego, por consejo de E. J. Corey, a investigar algunos problemas estructurales y mecanísticos de las moléculas orgánicas, colaborando, al final de su estancia, con R. B. Woodward (Nobel de química 1965). En 1965 se trasladó a la Universidad de Cornell, donde ha venido desempeñando, desde entonces, funciones docentes.

Hoffmann es un teórico de la química, a pesar de que su primera labor investigadora fuera esencialmente experimental. Sin embargo, ésta influyó en que sus investigaciones teóricas discurrieran por senderos del mayor interés para el químico; es decir, dentro del dominio llamado paradójicamente química teórica aplicada. Posee además una vocación por las formas y, por añadidura, un auténtico don para la asunción de valores estéticos. En un momento de su carrera científica estuvo al borde de abandonar ésta por la historia del arte. Su intuición geométrica, su búsqueda de la armonía en el espacio físico, ha determinado extensamente la orientación de su labor investigadora. Ha recibido multitud de distinciones: premio de Química Pura (1969, juntamente con Woodward) y el "Arthur C. Cope" (1973); el premio de la Academia Internacional de Ciencias Cuánticas Moleculares (1970) y los grados de doctor "honoris causa" por el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo y por la Universidad de Yale.



*Kenichi Fukui, premio Nobel de química 1981*

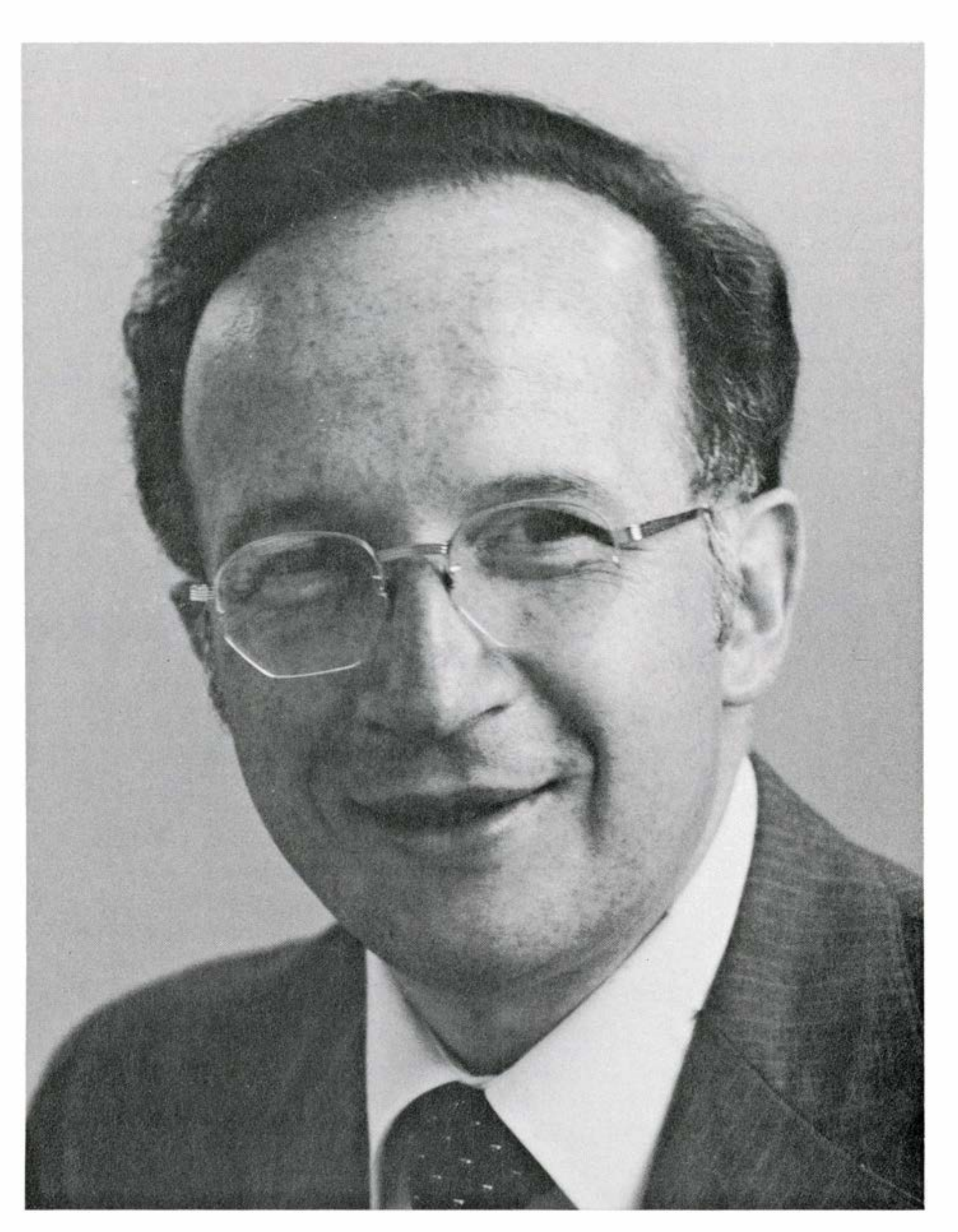
Kenichi Fukui nació en 1918 en la Prefectura de Nara (Japón). Se formó y desarrolló como científico casi enteramente en la Universidad Imperial de Kyoto. En 1941, pocos meses antes de iniciarse la intervención de su país en la Segunda Guerra Mundial, se graduó en ingeniería, recibiendo en 1948 el grado de doctor en ingeniería química. Fue nombrado "lecturer" (1943-1945), profesor ayudante (1945-1951) y finalmente profesor (desde 1951). En la propia Universidad de Kyoto, ha desempeñado los cargos de "councillor" (1970-1973) y de decano

de la Facultad de Ingeniería (1971-1973). Desde 1976 es "counsellor" del Instituto de Ciencia Molecular.

Fukui, todavía más acusadamente que su colega Hoffmann, inició su carrera como investigador en el campo experimental, concretamente en ingeniería química, ocupándose de un nuevo combustible sintético para mitigar los problemas energéticos de su país, agudizados por la guerra. Sin embargo, adelantándose a las ideas prevalecientes, en sus años de estudiante había llegado ya a la convicción de que se acercaba rápidamente el momento en que la química –cuyo progreso ha dependido siempre, casi exclusivamente, de la observación y de la experimentación– asumiría decidida e irresistiblemente los principios rectores del comportamiento de los electrones (la física cuántica), entonces desesperanzadamente remotos de la realidad.

Su entusiasmo y la profundidad de su convicción hizo que se preocupara tempranamente en adquirir, de forma poco menos que autodidacta, un insólito bagaje de conocimientos teóricos fundamentales, principalmente de física cuántica, y, desde luego, de matemáticas. Por ello, cuando decidió pasarse al campo teórico, pudo realizarlo con competencia. Así, por el año 1956, en el propio departamento de combustibles de la Universidad de Kyoto, había constituido ya un equipo de teóricos que laboraban en la aplicación de las leyes cuánticas a la química. Al igual que Hoffmann, sus conocimientos y su bagaje experimental le permitieron orientarse por senderos de máximo realismo y eficacia en el difícil proceso de plantear y desarrollar sus investigaciones teóricas.

En 1961, organizó el simposio sobre estructura electrónica de grandes moléculas, y, en 1979, el tercer congreso internacional de química cuántica, ambos en Kyoto. Actualmente es coeditor o miembro del comité editorial de varias revistas científicas internacionales y vicepresidente de la Sociedad Química del Japón.



*Roald Hoffmann, premio Nobel de química 1981*

Desde hace cosa de siglo y medio, el químico, enfrentado con la enorme complejidad de la química orgánica, se ha esforzado por establecer en ella un orden que permitiera inferir leyes de alguna generalidad. Fruto de ello fue la sistematización que aun prevalece, y que sigue reflejándose en los tratados de química orgánica actuales. Surgió posteriormente una ordenación de mayor grado de fundamentalidad, centrada primero en la estructura de las moléculas (la disposición relativa de los átomos en el espacio) y luego en factores de naturaleza electrónica. Tales ordenaciones fueron resultado, asimismo, de la evolución de la problemática de la propia química orgánica, influida profundamente por la asequibilidad de nuevas técnicas de observación y experimentación.

A principios del segundo cuarto del presente siglo, se incorporó plenamente a la química una variable-factor de importancia y trascendencia máximas: el *tiempo*, considerado como coordenada de reacción, y con él los conceptos y las técnicas de la cinética química, que siguen y seguirán permitiendo el estudio del mecanismo de las reacciones a través de la evolución de los pertinentes sistemas, desde los componentes hasta los productos de reacción. Se empezó a aplicar la termodinámica a fases intermedias de los sistemas reaccionantes, como el estado de transición, y aquellas otras correspondientes a la formación de especies moleculares intermedias fugaces, así como a procesos misteriosos, como la catálisis y las reacciones en cadena. Tales estudios representaron el nacimiento y el desarrollo de un nuevo tipo de conocimiento, que se concretó en una nueva disciplina o especialidad: la química orgánica física, popularizada por la obra de L. P. Hammett, "Physical Organic Chemistry" (Mc Graw-Hill, 1940), que introducía un enfoque y unas metodologías radicalmente nuevas. Hoy día tal especialidad está integrada plenamente en la química orgánica.

El impulso cobrado por la química orgánica física ha sido espectacular y enorme. Han contribuido al mismo escuelas de grandes investigadores, como



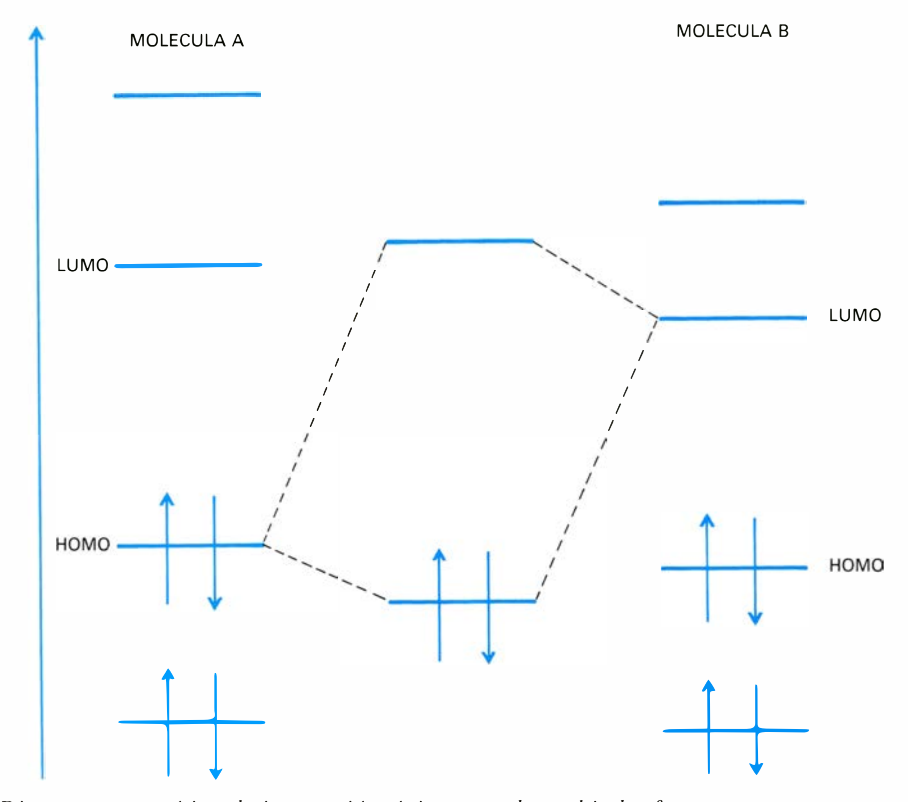




*Diagrama energético de interacción típico entre los orbitales frontera HOMO-LUMO de dos moléculas A y B, que representa una aproximación al estado de transición de la reacción entre ellas. Los trazos horizontales a la izquierda y a la derecha representan los niveles energéticos de los orbitales HOMO y LUMO y sus vecinos más próximos, ocupados o no por electrones, de las moléculas de partida, A y B. Cada flecha indica un electrón en un orbital molecular y el sentido de ella, su spin (↑ o ↓). Cada orbital ocupado (HOMO u otro) lo está por dos electrones de spin opuesto (↑ ↓). La interacción del HOMO de la molécula A con el LUMO de la B da lugar a dos nuevos orbitales, cuyos niveles energéticos se sitúan uno por debajo del HOMO de A y el otro por encima del LUMO de B (niveles del centro del diagrama). El par de electrones que ocupaba el HOMO (molécula A) se dispone entonces en el nuevo orbital molecular de menor energía, de lo que resulta una estabilización del sistema reaccionante. El nuevo orbital de energía superior queda sin ocupar*

la de C. K. Ingold y E. D. Hughes en el Reino Unido y las de M. S. Kharasch, de P. D. Bartlett y de S. Winstein en los Estados Unidos, fundadoras de la base mecanística de las reacciones orgánicas; escuelas en las cuales algunos químicos españoles, como R. Pérez-Ossorio (Hughes) y el autor de esta colaboración (Bartlett), pudimos integrarnos.

A partir de los años cincuenta, con la introducción de las técnicas espectrales en química orgánica, se ha logrado, además, no sólo un mejor y mayor conocimiento de la estructura de los compuestos químicos sino, por añadidura, incluso la verificación experimental de resultados inferidos de consideraciones y observaciones cinéticas y termodinámicas.

Merced a la célebre obra de física molecular dedicada a los químicos, "The Nature of the Chemical Bond" de L. Pauling (Cornell, 1939), y posteriormente a otra, "The Theory of Resonance", de G. Wheland (Wiley, 1944), el químico aprendió a manejar con soltura y creciente éxito y provecho algunos conceptos electrónicos, como el de la resonancia o mesomería, en la interpretación y predicción de las propiedades de las moléculas orgánicas, especialmente sus procesos reaccionales.

Sin embargo, a partir de la década de los años sesenta, se han ido poniendo de manifiesto graves limitaciones del método de la resonancia. Por ello, y ante el mayor escepticismo del mundo químico, se empezó a ensayar un nuevo concepto, el de los orbitales moleculares (MO) – que había sido aplicado con éxito en el estudio de moléculas electrónicamente sencillas, como la molécula-ion de hidrógeno ($H_2^+$)–, empleando a tal fin el método concebido por E. Hückel, basado en la aproximación llamada LCAO (en castellano, combinación lineal de orbitales atómicos). La aproximación de Hückel [(LCAO-MO) (*Z. Physik.*, **70**, 204 (1931)] clasifica los orbitales moleculares en dos tipos: los orbitales σ y los orbitales π, operando solamente con estos últimos, puesto que resultan ser los que intervienen en los procesos que tienen lugar dentro de la escala de energías en la que el químico se interesa.

Pero la adopción de los orbitales moleculares representaba abandonar las sencillas reglas de la resonancia electrónica por conceptos intrincados, como las funciones propias de operadores lineales y las nubes de probabilidad electrónica en el espacio ocupado por las moléculas, cuyo manejo exige un auténtico arsenal de conocimientos matemáticos y físicos, extraños para el químico, incluyendo el análisis vectorial, el cálculo matricial, las ecuaciones de Hamilton y de Lagrange con sus coordenadas generalizadas, etc., y la asunción de unos principios mecanocuánticos totalmente abstractos. [Véase, por ejemplo, la obra del autor, "Química Orgánica Física" (Pirámide, 1978), págs. 9-12, 19-126 y 160-162.]

Por ello, los métodos basados en los orbitales moleculares no han llegado a ser realmente asequibles, a ser empleados ampliamente, hasta hace pocos años, a partir del momento en que, entre la multitud de orbitales, se logró discernir aquellos pocos que realmente mandan, y éste es uno de los grandes méritos de nuestros galardonados. Con ello se ha conseguido, además, el reencauzamiento de una parte importante de la labor investigadora en química.

Efectivamente, si bien a Hoffmann se debe una generalización del método de Hückel, que incluye los orbitales σ [*J. Chem. Phys.*, **39**, 1937 (1963); **40**, 2480 (1964)], su aportación más conocida y apreciada, fruto de la colaboración con Woodward, ha sido la aplicación de sencillas consideraciones de enlace y simetría en la elucidación de la estructura electrónica de los estados de transición y de los compuestos intermedios en ciertas reacciones de las moléculas orgánicas; concretamente, la formulación de las reglas de Woodward-Hoffmann para las reacciones concertadas, como las cicloadiciones –unas veces prohibidas, otras veces permitidas– que hasta entonces habían desconcertado al químico orgánico [*J. Amer. Chem. Soc.*, **87**, 396, 2046, 2511, 4388 (1965); *Accounts Chem. Res.*, **1**, 17 (1968); véase también la obra de Woodward y Hoffman, "The Conservation of Orbital Symmetry" (Verlag Chemie, 1970)].

Dentro de la misma línea, Fukui había encontrado los primeros ejemplos en que la actividad de los compuestos orgánicos dependía de la distribución electrónica de los orbitales moleculares HOMO y LUMO, siglas inglesas de "orbital molecular ocupado de máxima energía" y de "orbital molecular vacío de mínima energía", respectivamente, extendiendo el pertinente tratamiento a las reacciones químicas en general [*J. Chem. Phys.*, **20**, 722 (1952); **22**, 1433 (1954)]. La idea básica de tal tratamiento es la deslocalización electrónica entre los HOMO y LUMO de las especies reaccionantes. En su primer trabajo sobre este nuevo enfoque, Fukui bautizó a aquéllos con el nombre de orbitales frontera.

La introducción de los orbitales frontera en la química orgánica ha desplazado casi por completo la anterior teoría electrónica de la reaccionabilidad, basada solamente en la distribución de carga eléctrica y de densidad electrónica del conjunto de todos los orbitales ocupados de la molécula.

El método ha sido desarrollado ampliamente por la propia escuela de Fukui y por otras, acuñando nuevos términos para nuevos conceptos, como coordenada intrínseca de reacción (IRC) y otras locuciones de no fácil pronunciación, como superdeslocalizabilidad y pseudoexcitación. Pero lo que ha atraído más la atención general ha sido el hallazgo, casi simultáneo con Hoffmann y Woodward, de las relaciones de simetría en reacciones concertadas. A partir de ese punto, las investigaciones de ambos galardonados se complementan y se asisten mutuamente. El estado actual de éste y otros importantes temas afines se describe en la obra de I. Fleming, "Frontier Orbitals and Organic Chemical Reactions" (Wiley, 1976). (Manuel Ballester.)

## *Interferón*

Aun cuando el fenómeno de la "interferencia" había sido apreciado y descrito ya en 1804 por Jenner, al observar que en los pacientes de herpes no se presentaban pústulas vacunales en la misma zona, se señala como auténticos descubridores del interferón a A. Isaacs y J. Lindenmann, quienes, en el Instituto de Investigaciones Médicas de Londres, descubrieron, hacia 1957, que las células infectadas por un virus inactivado se hacían resistentes a la infección por otros virus y que el medio de cultivo de tales células infectadas podía inducir resistencia en otras células frente a cualquier infección por virus. A la sustancia responsable de esta acción "interferente" se la denominó "interferón".

Entre las observaciones de Jenner y la publicación de los estudios de Isaacs y Lindenmann, habían sido observados otros fenómenos relacionados, entre los que destacan los descritos por Magrassi, en 1935, según los cuales una sustancia distinta de un anticuerpo protegería al conejo contra la encefalitis que podría ocasionar un virus herpético encefalitógeno si otro virus herpético no encefalitógeno actuaba también. Muy probablemente Pasteur, desde 1866, manejó el interferón, aunque sin darse cuenta, al utilizar virus atenuados de la rabia como vacuna frente a personas mordidas por perros rabiosos. Actualmente se sabe que los virus son inductores que estimulan eficazmente la producción de interferón.

En 1980, fecha en que se obtiene a través de las técnicas de bioingeniería, se definió el interferón como "una proteína que ejerce actividad antivírica no específica, por lo menos en células homólogas, mediante procesos del metabolismo celular que afectan a la síntesis tanto del ARN como de las proteínas". Aun cuando se habla habitualmente de interferón, sería más correcto referirse a los "interferones". No se trata, en efecto, de una especie química o sustancia bien definida, sino de un grupo de compuestos que tienen, lógicamente, numerosos aspectos comunes, pero que también muestran diferencias según sea su procedencia; estas diferencias afectan a la propia composición química, a su tamaño molecular y a sus propiedades físico-químicas y biológicas.

En los interferones se presenta el fenómeno de especificidad: el interferón de leucocitos humanos protege muy poco a las células de ratón frente a la infección; y análogamente sucede con el interferón de ratón respecto a células humanas. En otros casos, empero, esta especificidad es menor.

La dificultad de obtener muestras de interferones en cantidad adecuada y que reúnan, además, un grado de pureza suficiente para estos fines ha frenado seriamente el avance en este campo. Los interferones hasta ahora estudiados pertenecen generalmente al grupo de las así llamadas *glicoproteínas* (= glucidoproteidos). Esto es absolutamente válido para el interferón de rata, de conejo y para el fibroblástico humano. Pero no hay pruebas de que existan componentes glucídicos en la composición del interferón leucocitario humano. La dificultad en establecer la naturaleza exacta de tales compuestos viene en gran parte ocasionada por no haberse obtenido los interferones completamente puros hasta el año 1980. De todos modos, se sabe que incluso en ausencia de esos componentes glucídicos la actividad del interferón se mantiene, aunque la estabilidad de la molécula tal vez se resienta. Los interferones presentan, al igual que muchas glicoproteínas, un polimorfismo que se manifiesta como heterogeneidad en cuanto a carga eléctrica (motivada, a lo menos en parte, por su contenido variable en ácido siálico). Otras causas de heterogeneidad pueden ser: la posibilidad de codificación del interferón en su biosíntesis por más de un gen; las degradaciones de la porción protídica (o de la parte glucídica) de la molécula; y las variaciones que afecten a la biosíntesis de dicha porción glucídica.

En cuanto a la composición de la parte protídica, trabajos referentes al interferón de fibroblastos humanos señalan el alto contenido en esta molécula de los aminoácidos glutámico/glutamina y leucina, así como la importancia de los puentes disulfuro para la actividad biológica. También se ha descrito la sucesión o secuencia de aminoácidos del interferón aislado de fibroblastos humanos, que se halla formada por 166 residuos de aminoácidos. Mediante *E. coli* se ha obtenido interferón leucocitario humano, biológicamente activo, formado por 165 aminoácidos. Se han encontrado interferones de pesos moleculares comprendidos entre 15.000 y 24.000 dalton, aunque varios autores han señalado cifras de 26.000 o superiores para otros interferones. ¿Cómo se obtiene esta proteína? A través de cuatro vías: a partir de leucocitos, de fibroblastos, de células linfoblastoides y por ingeniería bioquímica.

Utilizando sangre de donantes, se ha logrado en Finlandia, por K. Cantell, la separación de grandes cantidades de leucocitos; éstos, una vez infectados por virus Sendai (que actúan como agentes inductores), biosintetizan interferón. Las etapas siguientes están destinadas a purificar dicho interferón, aislándolo de otras proteínas acompañantes. El interferón así obtenido pertenece al tipo I, y es el denominado IFN-$\alpha$ o más precisamente HuLeIF (interferón leucocitario humano). Se estima que el grado de purificación de este interferón suele ser bastante escaso, habiéndose usado, no obstante, para ensayos clínicos preparados del mismo que pueden contener sólo una proporción de una molécula de interferón por 99 de otras proteínas acompañantes. El

grado de pureza se mide mediante unidades que, aun siendo arbitrarias, constituyen un modo aceptable de expresar la actividad de las muestras. Se define como una unidad de interferón la cantidad del mismo necesaria para reducir al 50 por ciento la actividad vírica de un preparado (o que protege en un 50 por ciento las células ensayadas contra la infección vírica utilizada). La actividad antivírica se expresa en unidades de interferón por miligramo de proteína (U/mg proteína) o, a veces, por mililitro de preparado (U/ml). Con un material de partida que contenga de $10^3$ a $10^4$ U/mg proteína, puede obtenerse un preparado final que porte hasta $10^9$ U/mg proteína.

Para conseguir interferón a partir de fibroblastos, se utilizan cultivos de fibroblastos fetales. Los fibroblastos se someten al tratamiento con virus o con ciertos fragmentos de ARN para inducir la biosíntesis del interferón, que será en este caso de tipo I, el denominado IFN-β (o más exactamente, HuFiIF). Aun cuando la fase de biosíntesis es corta (como para el IFN-α), también aquí el rendimiento es escaso.

Se produce también a partir de células linfoblastoides, que proceden de linfomas o de tumores, habiendo resultado particularmente valiosas las de la línea Namalva. Si bien el rendimiento obtenido con este material es mayor que con los dos anteriores, su uso para ensayos humanos se ha visto restringido dado su origen tumoral y el peligro, aunque sea remoto, que ello implica.

La aplicación con éxito de las técnicas de ingeniería bioquímica a la obtención de interferón, por el equipo de Ch. Weissmann y colaboradores, se anunció el 18 de enero de 1980. Utilizaron leucocitos humanos de la misma cepa empleada para la producción de interferón en Finlandia, una vez infectados por virus. Extrajeron el correspondiente ARN mensajero (ARNm) de dichos leucocitos, que se hallaba inevitablemente mezclado con otros ARNm. Con el ARNm correspondiente al interferón, prepararon (mediante la actividad catalítica de la transcriptasa de inversión o transcriptasa inversa) el ADN complementario (ADNc), juntamente con los otros ADNc no deseados. Insertando después los fragmentos de ADNc en un plásmido (pequeña unidad circular de ADN bacteriano existente en las bacterias con independencia del ADN cromosómico) de *Escherichia coli*, introdujeron estos plásmidos de recombinación en bacterias *E. coli*, donde se multiplicaron. Sólo en algunas de estas colonias se detectó el ADNc que correspondía al ARNm del interferón. Mediante estas técnicas se ha conseguido obtener una o dos moléculas de interferón por célula bacteriana, rendimiento comparativamente inferior al logrado por los otros procedimientos. Sin embargo, las posibilidades de incrementar ese rendimiento y, sobre todo, las nuevas perspectivas que abre ese método, le han convertido en un instrumento valioso para futuros trabajos y para la obtención de otras moléculas de interés bioquímico.

Se admite actualmente que cualquier célula de un vertebrado es capaz de producir interferón. Se sabe que existe interferón en reptiles, aves y mamíferos. Agentes muy variados, denominados inductores, estimulan la biosíntesis de interferones: virus con ARN de cadena sencilla (monocatenarios), como los mixovirus (a los que pertenece el de la gripe) y los paramixovirus; con cadena doble, como los reovirus; y virus con ADN de cadena doble, como los de la herpes. También ciertas bacterias gram-negativas (*Brucella abortus, Salmonella typhimurium, Escherichia coli*) y sus endotoxinas. Asimismo, los ARN bicatenarios procedentes de microorganismos. Una estructura de aquellos dotada de estabilidad, con peso molecular elevado, favorece la actividad inductora. Análogamente, sustancias sintéticas como polirribonucleótidos del tipo poli I: poli C, pirano, ácido poliacrílico y tilorona. Finalmente, fitoaglutininas, también llamadas lectinas, y antígenos. La estimulación en este caso es más lenta que si fuera por virus, y determina la formación del interferón tipo II o inmune.

En el complejo mecanismo de acción de los interferones se hallan implicados un mínimo de tres enzimas. Los interferones determinan la inhibición de la síntesis de proteínas, habiéndose propuesto la existencia de un doble mecanismo para ello. Las propiedades antivíricas del interferón fueron observadas con gran interés desde un principio y han servido para su caracterización y ensayos. Se admite que los interferones contribuyen a los mecanismos defensivos de los vertebrados frente a los virus. Y si todas las células de un organismo están capacitadas para biosintetizar interferón, es lógico pensar que su cometido biológico sea más amplio y no únicamente defensivo. ¿Por qué no el del control de la expresión de los ARN en la célula? Desde 1974, se ha confirmado que debe considerarse al interferón no simplemente como una sustancia antivírica, sino más bien como un modulador de las síntesis que tienen lugar en la célula, de las que la acción antivírica sería el resultado. Ahora bien, el modulador biológico en cuestión podría no ser propiamente el interferón, sino una proteína antivírica que se produciría en la célula, una vez que ésta ha establecido contacto con el interferón. Se estima que para tal contacto se necesita en la célula la presencia de receptores (probablemente de tipo gangliosídico).

Se admite que el interferón intervendría en etapas del ciclo del virus (bloqueándolas), tales como la transcripción del ARN vírico, la traducción de éste en proteínas, la replicación (en virus causantes de tumores que contienen ARN) o la eliminación de la cápside vírica. En estos procesos tendría un papel preponderante la célula hospedadora.

Entre las propiedades no antivíricas del interferón se han señalado sus acciones antitumorales. Estas actividades se realizarían mediante dos mecanismos distintos: disminución de las mitosis celulares y modificación de la

| | |
|---|---|
| ACTIVIDADES ENZIMATICAS DEPENDIENTES DEL ARN BICATENARIO Y DEL ATP | Actividad de la 2'-5'A sintetasa, que determina la biosíntesis de un oligonucleótido del tipo de adenilatotrifosfato (2'-5'A) con uniones fosfodiéster en 2'-5' en vez de en 3'-5' como es habitual, que activa una ribonucleasa, la cual destruye los ARNm. Así, dicho sistema 2'-5'A se comporta como un inhibidor de la síntesis de proteínas. |
| | Actividad de la proteincinasa, que determina la inhibición del factor de iniciación de la síntesis de proteínas denominado $IF_2$, al fosforilar una de las subunidades de éste, dejándolo incapacitado para la formación del complejo de iniciación. |
| ACTIVIDADES INDEPENDIENTES DEL ARN BICATENARIO Y DEL ATP | Inhibición de la síntesis de proteínas en la etapa de alargamiento de ésta, probablemente a causa de la degradación de la síntesis del ARNt por una 2'-fosfodiesterasa inducida por el interferón. |
| | Posible metilación de los ARNm. |
| BIOSINTESIS DE OTRAS PROTEINAS EN LA CELULA | |

*Procesos bioquímicos inducidos por el interferón en la célula animal*

membrana celular. Es un hecho comprobado que, cuando las células del sistema inmunitario capaces de destruir células tumorales ("natural killer cells" = NK) por su poder citotóxico espontáneo, actúan frente a células tumorales, hay producción de interferón. Asimismo, el interferón obtenido sintéticamente con intervención de la bacteria *E. coli* posee actividad antiproliferativa, además de la actividad antivírica.

El uso como posibles agentes antitumorales de los interferones (o de sus inductores) fue una de las primeras aplicaciones vislumbradas y objeto del preferente interés que se concedió a estas sustancias desde su descubrimiento.

En 1981, varios investigadores se preguntaron si el interferón tendría porvenir, ya que, aun siendo cierto que los resultados de su empleo son favorables en enfermedades víricas (herpes, rabia, etcétera) donde se necesitan dosis pequeñas del mismo, no sería esto extensivo a los tratamientos de tumores, en los que las dosis y tiempo de empleo son grandes. En estos casos, parece ser que se aprecia una mejoría (más que una verdadera curación) en porcentajes del 10 al 30 por ciento de pacientes tratados. También se ha señalado, en 1981, que el interferón no sería mejor que algunos agentes quimioterápicos usados en tratamientos de mieloma múltiple, cáncer de mama o melanoma, ya que de 82 pacientes tratados en Estados Unidos con interferón sólo del 25 al 40 por ciento respondieron favorablemente.

Por otro lado, algunos efectos secundarios, tales como caída del cabello, náuseas y fiebre, también han sido descritos en pacientes así tratados. La propia toxicidad, que se atribuyó a las impurezas de los preparados iniciales, se ha comprobado que debíase al interferón. No hay que olvidar que existen formas de cáncer resistentes al interferón; y que, en las restantes, si se interrumpe el tratamiento, suele cesar el efecto favorable. Como también pueden aparecer las temidas metástasis. No obstante, habiéndose aplicado con fines clínicos generalmente los interferones IFN-$\alpha$ e IFN-$\beta$, pero no el IFN-$\gamma$, cabe aún esperar que éste pueda resultar más eficaz que los anteriores.

Deliberadamente, hemos prescindido de mencionar la faceta económica de estos tratamientos, elevadísima hace pocos meses, y todavía cara, pero que ha descendido (y es previsible baje más, a medida que las técnicas de obtención se perfeccionen). El hecho de que se hayan constituido recientemente empresas en diversos países, a veces con planes de trabajo parcialmente

dirigidos o subvencionados por los gobiernos o en coordinación con universidades y centros de investigación, confirma la importancia de este tema e incita a seguir trabajando intensamente sobre el mismo. (José A. Cabezas Fernández del Campo.)

### *Aprobada la construcción del LEP*

En 1979 se publicó un estudio detallado del LEP (colisionador de electrones y positrones), que sirvió de base para la presentación de una propuesta formal de construcción a los países miembros del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) en junio de 1980. En una reunión especial del Consejo del CERN, que tuvo lugar el 30 de octubre de 1981, se aprobó definitivamente la construcción del LEP.

El CERN es un laboratorio europeo, con sede en Ginebra, dedicado a la investigación de las componentes fundamentales de la materia, para lo cual es necesario disponer de grandes aceleradores, que son instrumentos que, mediante la acción adecuada de campos electromagnéticos, permiten acelerar haces de partículas cargadas a grandes energías. Los países miembros del CERN son: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia, Gran Bretaña, Grecia, Holanda, Italia, Noruega, Suecia y Suiza. España ingresó en el CERN en 1961 y se retiró, en 1969, alegando razones de tipo económico.

Los grandes aceleradores hoy día existentes se pueden clasificar en dos categorías: los de blanco fijo y los de colisión de haces. En los primeros se acelera un haz de partículas y se le hace chocar con un blanco fijo, mientras que en los segundos se logra disponer de dos haces acelerados que se hacen chocar en colisión, prácticamente frontal. A grandes rasgos, la ventaja de los primeros es que se producen mayor número de choques por unidad de tiempo, mientras que en los segundos se obtiene mayor energía por choque. En los grandes aceleradores, la energía alcanzada por las partículas se mide en gigaelectronvolt (GeV), donde 1 GeV = $10^9$ eV, siendo eV (electronvolt) la energía que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de un volt. Esto implica que 1GeV = $1{,}6 \times 10^{-10}$ J (joule).

Desde junio de 1976 el CERN dispone de un supersincrotrón de protones (SPS), que es un acelerador de blanco fijo, de casi 7 kilómetros de circunferencia, en el que los protones llegan a alcanzar energías de hasta 400 GeV. Este acelerador con uno análogo que hay en el Fermilab, cerca de Chicago, son los mayores del mundo.

Hoy día se cree que los constituyentes fundamentales de la materia se pueden agrupar en dos familias de partículas sin estructura conocida: los leptones y los quarks. De acuerdo con la teoría prevaleciente, los neutrones y protones, constituyentes de los núcleos atómicos, son partículas compuestas; el protón es un estado ligado de dos quarks de tipo *u* ("up", arriba) y otro de tipo *d* ("down", abajo), mientras que el neutrón está formado por dos quarks de tipo *d* y uno de tipo *u*. El electrón es un leptón, así como también el neutrino electrónico emitido en las desintegraciones beta de los núcleos. Esas cuatro partículas forman la llamada primera generación y, por razones que nos son desconocidas, sabemos que existen al menos tres generaciones con un total de seis quarks y seis leptones. Los quarks interaccionan entre sí intercambiando unas partículas llamadas gluones, de las que existen ocho distintas. Por otra parte, quarks y leptones interaccionan a través de las fuerzas electrodébiles, unificadoras de las interacciones electromagnéticas y débiles, intercambiando fotones y unos nuevos mesones vectoriales, aún no descubiertos experimentalmente, llamados $W^{\pm}$ y $Z^0$.

Hace algunos años, un estudio cuidadoso de la situación teórica y experimental que acabamos de describir hizo ver que, si Europa deseaba mantenerse en primera línea en la investigación de altas energías, era necesario planear la construcción de un nuevo acelerador y que el instrumento más adecuado era una máquina en la que chocaran frontalmente un haz de electrones y otro de antielectrones, que se denominó LEP. La construcción del LEP se iniciará este año de 1982. Su circunferencia medirá más de 27 kilómetros. En un primer estadio, que puede entrar en funcionamiento a finales del año 1987, se alcanzará una energía de 50 GeV en cada haz, a un coste de 910 millones de francos suizos, con lo cual será posible confirmar la existencia de los nuevos mesones vectoriales $W^{\pm}$ y $Z^0$. La máquina está optimizada a una energía de 85 GeV por haz; esta segunda fase puede concluir antes de finalizar esta década. Más adelante se podría elevar la energía a unos 135 GeV si nuevas técnicas experimentales para acelerar partículas, basadas en la superconductividad, se demuestran posibles. (Pedro Pascual.)

# Titán

*El mayor de los satélites de Saturno es el único del sistema solar que tiene una atmósfera importante. La química de ésta pudiera semejarse a la de la atmósfera terrestre antes de que comenzara la vida*

Tobias Owen

El 12 de noviembre de 1980, el vehículo espacial *Voyager 1* pasó a 7000 kilómetros de Titán, el mayor de los satélites de Saturno. Era el máximo acercamiento que el *Voyager 1* o el *Voyager 2* alcanzaban respecto a un satélite o planeta, pero hubo que pagar el precio. La pasada significaba que el *Voyager 1* no podía ser redirigido por la gravitación de Saturno: continuaría adelante a través del sistema solar para aproximarse hasta Urano y Neptuno. El sacrificio parecía aconsejable; Titán era, según se sabía, el único satélite del sistema solar que tenía una atmósfera importante. Además, su color rojizo, que lo distingue de los demás satélites de Saturno, sugería que la química de su atmósfera podía estar produciendo compuestos coloreados. Dada la proximidad de Titán, los instrumentos a bordo del satélite podrían cumplir en óptimas condiciones su cometido.

Los resultados del encuentro muestran que el sacrificio mereció la pena. Con la Tierra, Titán es el único cuerpo del sistema solar cuya superficie está, al menos parcialmente, cubierta de líquido; sólo que, en el satélite, el líquido es metano. Los instrumentos del Voyager revelaron que la atmósfera de Titán era más densa que la nuestra. Esta atmósfera más densa ha retenido condiciones muy parecidas a las que probablemente existían en todos los planetas poco después de su formación. Específicamente, la de Titán consta de carbono, nitrógeno e hidrógeno, pero le falta oxígeno molecular. Bajo esas condiciones, las reaciones químicas que ocurren hoy allí pueden originar muy bien algunas de las moléculas orgánicas que se cree precedieron a la vida en la Tierra.

## La presencia de una atmósfera

Christiaan Huygens descubrió Titán en la primavera de 1665, año en el que también propuso la idea de que Saturno tenía anillos. El cuerpo fue bautizado casi dos siglos después, cuando Sir John Herschel asignó nombres a los siete satélites de Saturno que se conocían entonces. El nombre, Titán, se escogió con pleno acierto. Herschel sabía sólo que era el más brillante de los satélites de Saturno; más tarde se supo que era también el mayor. Supera al propio Mercurio. Durante algún tiempo se creyó que era el mayor entre los satélites que había en el sistema solar. Las mediciones tomadas por el *Voyager 1* demuestran que no ocupa el primer lugar, estrictamente hablando. Las primitivas medidas habían pecado de exageración por culpa de la atmósfera de Titán. La parte sólida del satélite tiene un radio de 2575 kilómetros. Ganimedes, satélite de Júpiter, es mayor: mide 2640 kilómetros de radio.

La primera indicación de la existencia de atmósfera en Titán provino de observaciones del cuerpo que el astrónomo catalán José Comas Solá publicó en 1908. Comas Solá informó que el diminuto disco de Titán que distinguía a través de su telescopio era más oscuro hacia su borde, o periferia, que hacia el centro. Adujo como razón la presencia de una atmósfera. En efecto, la luz solar reflejada hacia la Tierra por el borde de Titán debe atravesar un espesor de atmósfera de éste mayor que la luz solar reflejada por el centro del disco. Así, la luz procedente de los bordes es atenuada por la atmósfera de Titán en mayor medida.

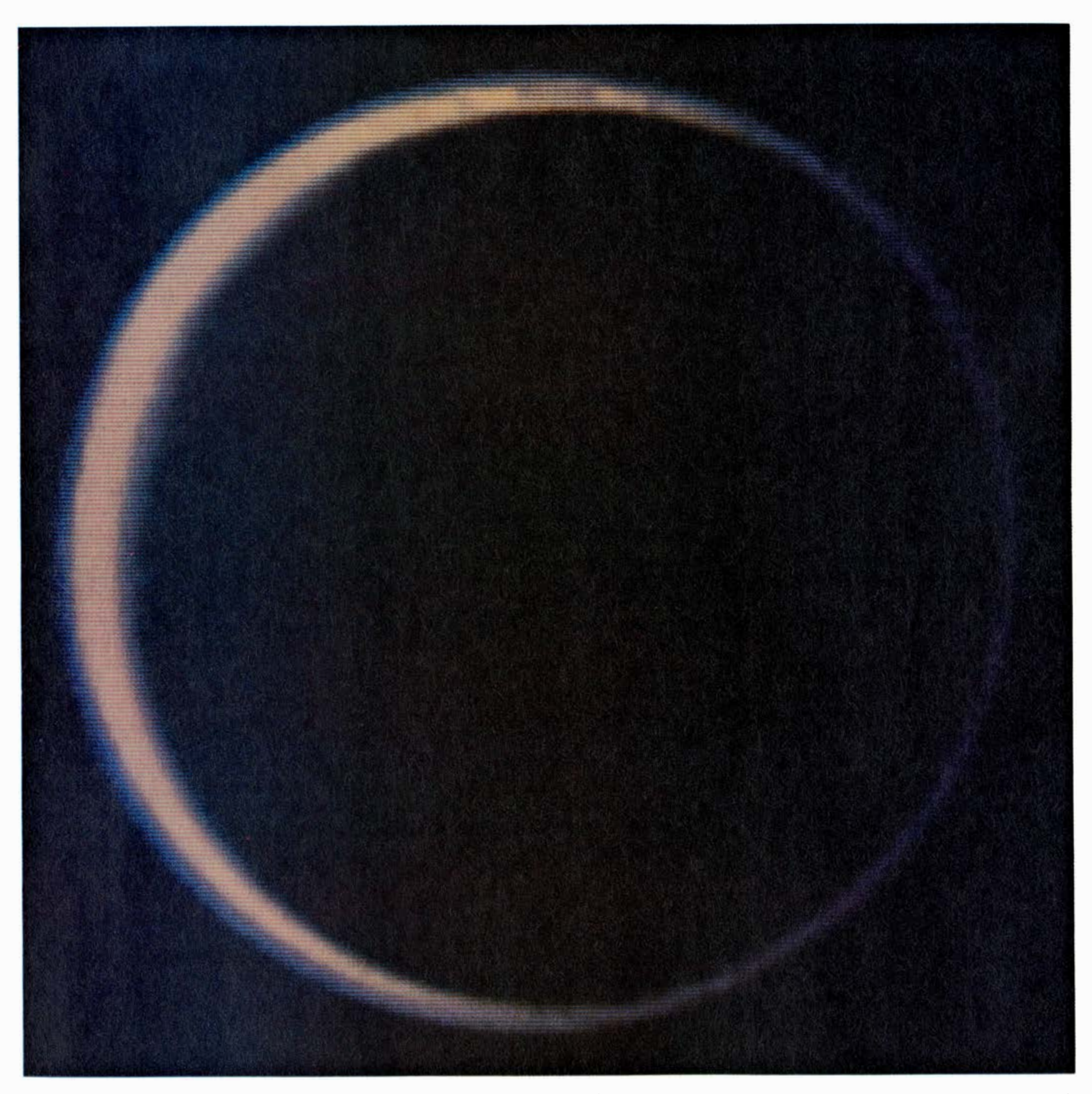
Es difícil saber si Comas Solá observó realmente que los bordes de Titán eran más oscuros. Las descripciones que dio sobre manchas nubosas en los satélites gigantes de Júpiter eran erróneas. Sin embargo, sus observaciones parecen haber conducido a Sir James Jeans a incluir Titán y los satélites gigantes de Júpiter en su estudio teórico de la fuga de las atmósferas de los cuerpos del sistema solar. En 1916, Jeans llegó a la conclusión de que, a pesar de su pequeño tamaño y débil gravedad comparada, por ejemplo, con la de la Tierra, Titán había probablemente retenido una atmósfera merced a su baja temperatura. La distancia de Titán al Sol, combinada con una estima razonable de su reflectividad (y, a causa de ello, pérdida de calor solar), conduce a la predicción de que su superficie y su atmósfera deben tener una temperatura de entre 60 y 100 grados Kelvin. Para tal intervalo, el trabajo de Jeans muestra que una substancia gaseosa cuya masa molecular sea de 16 o mayor no podría escapar de Titán a lo largo de la historia del sistema solar.

Varias substancias satisfacen el límite de masa molecular de Jeans. Una de ellas es el amoniaco ($NH_3$), cuya masa molecular es 17. En el decenio de 1930, Rupert Wildt, de la Universidad de Göttingen, lo identificó como un componente de la atmósfera de Júpiter. Wildt había hallado que el espectro de la luz solar reflejada desde Júpiter presentaba absorción de la radiación a las longitudes de onda características de las moléculas del amoniaco. Por un método similar, Theodore Dunham Jr., del Observatorio del Monte Wilson, detectó amoniaco en Saturno. A la temperatura supuesta para Titán, no obstante, el amoniaco sería sólido; no podría constituir, pues, una parte substancial de la atmósfera. Otras substancias que satisfacen el límite son el argon, neon y nitrógeno molecular ($N_2$). Todos ellos deberían haber tenido una concentración apreciable en la mezcla de gases y polvo que se condensó para formar el sistema solar. Pero son difíciles de detectar espectroscópicamente. Ninguno de ellos absorbe mucha radiación en el infrarrojo.

Todavía hay otra substancia que satisface el límite: el metano ($CH_4$), cuya masa molecular es 16. A diferencia del argon, neon y nitrógeno molecular, el metano tiene un grupo de intensas bandas de absorción en el infrarrojo y, a

diferencia del amoníaco, es gaseoso a la temperatura predicha para Titán. En 1932, Wildt identificó el metano en los espectros de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Después, en 1944, Gerard P. Kuiper, de la Universidad de Chicago, lo identificó en el espectro de Titán. Su descubrimiento constituyó la primera prueba sólida de que Titán tenía atmósfera. Comparando el espectro de Titán con espectros del metano a baja presión en el laboratorio, Kuiper dedujo que la absorción de luz solar por el gas a lo largo de un camino vertical a través de la atmósfera equivalía a la absorción de tal radiación por una columna de metano de 200 metros de altura a la presión de una atmósfera terrestre y a la temperatura de 273 grados Kelvin. (Tales condiciones se conocen como condiciones normales, CN). A efectos de comparación, una columna vertical que se extienda hasta la cima de la atmósfera terrestre equivale a una columna de ocho kilómetros de altura en CN.

Algunas dificultades subyacentes a la interpretación primitiva de la atmósfera de Titán empezaron a manifestarse en 1965 cuando Frank J. Low, de la Universidad de Arizona, dedujo, a partir del brillo de la radiación que Titán emitía a la longitud de onda de 10 micrometros en el infrarrojo, que la temperatura del cuerpo era de 165 grados Kelvin, casi el doble de la temperatura que se podría atribuir al simple calentamiento solar de la superficie y baja atmósfera del satélite. El descubrimiento de Low pasó casi desapercibido durante siete años, hasta que varios investigadores toparon con nuevas sorpresas.

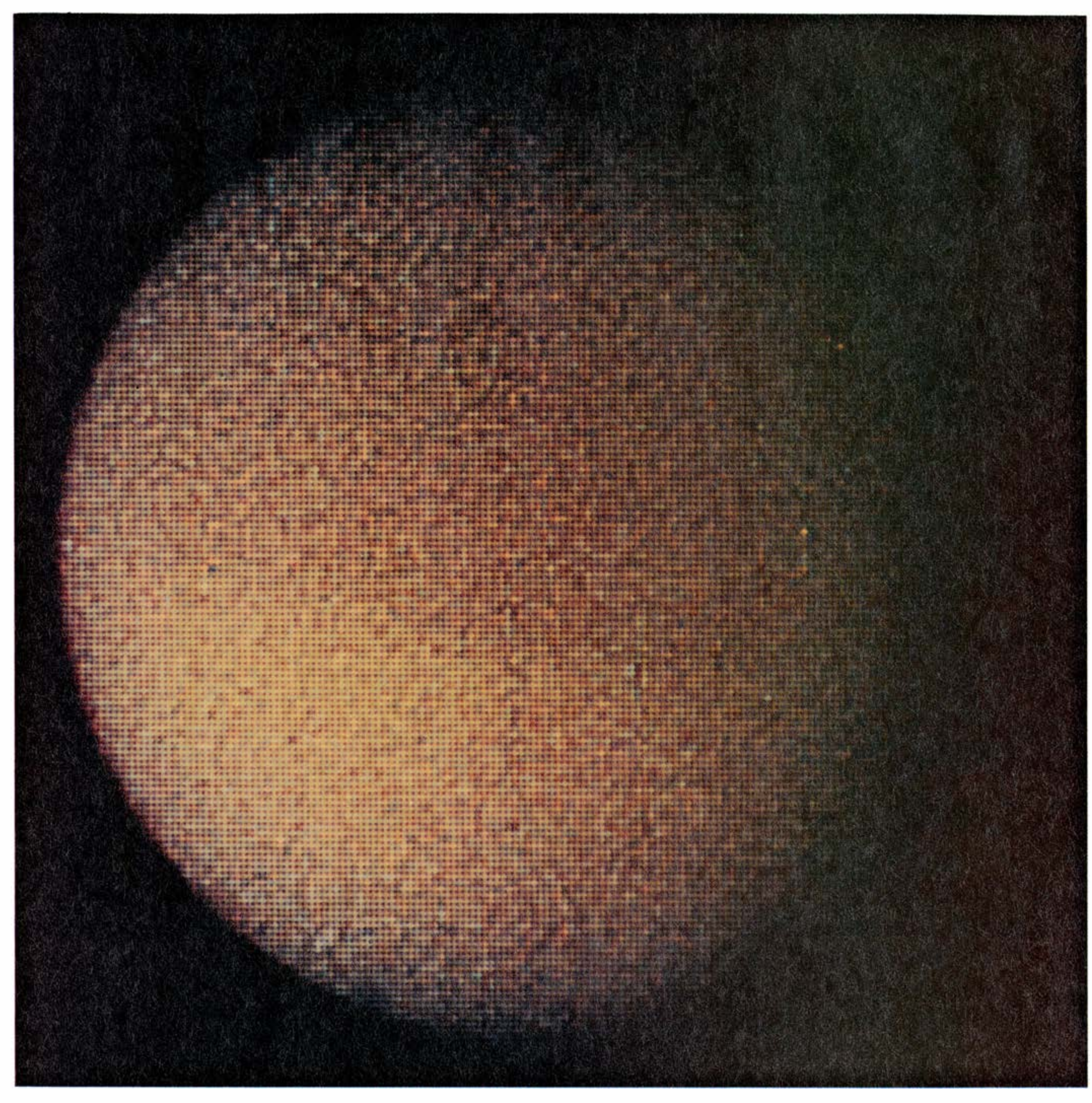


**ATMOSFERA DE TITAN, recogida en esta imagen de su hemisferio nocturno tomada el 25 de agosto de 1981 por el vehículo espacial *Voyager 2*. La zona anaranjada en forma de cuarto creciente que constituye la parte izquierda del borde de Titán representa la reflexión de la luz solar por un aerosol o capa de partículas suspendidas en la atmósfera, a unos 200 kilómetros por encima de la superficie. El halo azul que rodea tanto el creciente como la parte no iluminada del borde de Titán representa la difusión de la luz solar a grandes ángulos por partículas de bruma suspendidas a 300 kilómetros de la superficie.**

Por una parte, los cálculos de la temperatura, basados en el brillo a varias longitudes de onda en el infrarrojo, distaban de dar valores concordantes. El "brillo" de Titán a longitudes de onda de radio también presentaba discordancias. El radiobrillo en una observación condujo a una temperatura en la superficie de 200 grados Kelvin.

Todavía más, la luz reflejada desde Titán a los pequeños ángulos que predominan entre el Sol, el satélite y la Tierra, resultaba tener polarización positiva: el vector que representaba la máxima intensidad de la componente eléctrica del campo electromagnético de la luz era perpendicular al plano determinado por el ángulo. Este descubrimiento, realizado independientemente por Joseph F. Veverka, de la Universidad Cornell, y Benjamin H. Zellner, de la Universidad de Arizona, sugería que la luz reflejada desde Titán no provenía de la superficie sólida del cuerpo a través de una atmósfera transparente, sino de una espesa atmósfera ocupada enteramente por nubes. Piénsese que Marte, por ejemplo, sólo tiene una delgada atmósfera y la luz que refleja hacia la Tierra a pequeños ángulos ofrece una polarización negativa: el máximo del vector campo eléctrico se halla en el plano del ángulo.

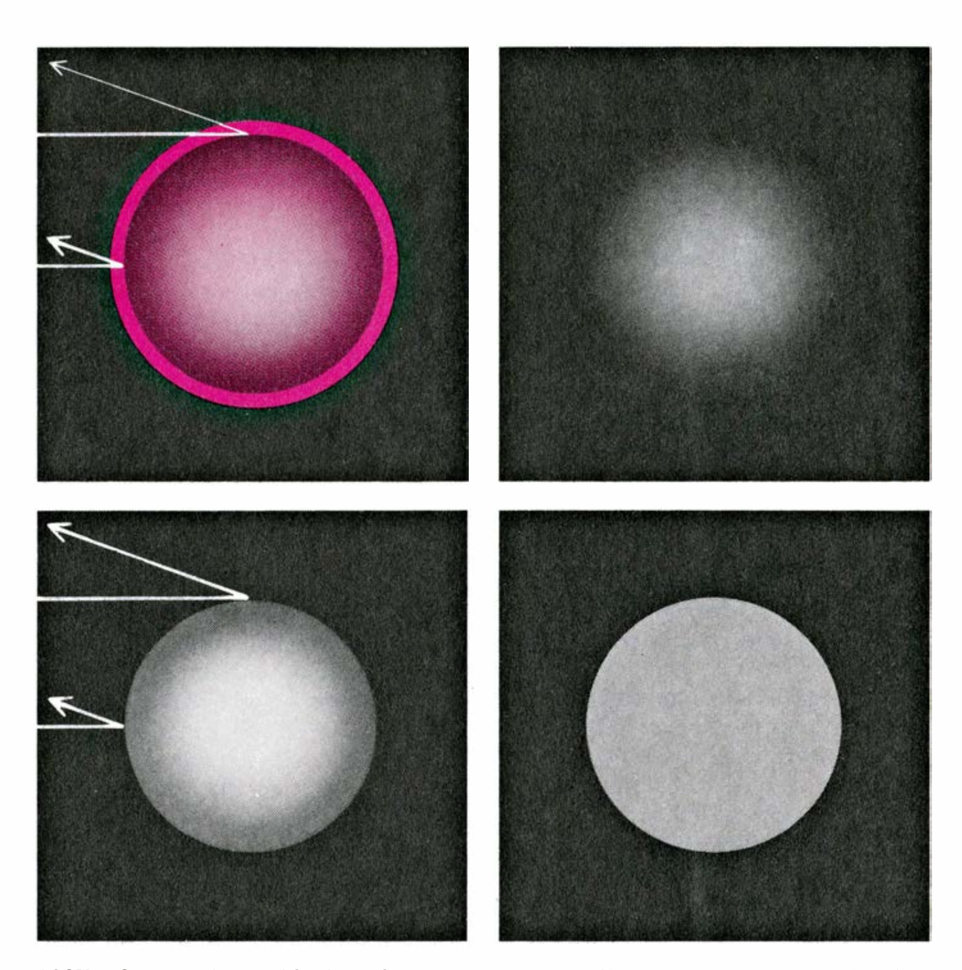
Mientras tanto, Laurence M. Trafton, de la Universidad de Texas en Austin, había supuesto que la cantidad real de metano en Titán debía superar con mucho a la deducida por Kuiper o, en otro caso, debía haber algún otro gas presente en cantidad apreciable. Con la ayuda de un intensificador de imagen infrarroja que acababa de po-



**LADO ILUMINADO DE TITAN, fotografiado por el *Voyager 1* el nueve de noviembre de 1980, tres días antes de que el vehículo espacial pasase a menos de 7000 kilómetros del cuerpo. En la imagen resultante, la superficie de Titán queda oculta por la opacidad de la capa continua de aerosoles. El hemisferio Sur brilla más que el septentrional, quizás en respuesta a un cambio estacional de la velocidad de producción de los aerosoles. Es primavera en el hemisferio Norte; vale decir: el hemisferio Sur acaba de pasar por un verano que ha durado siete años. (Fotografía cedida por el Jet Propulsion Laboratory.)**

nerse a punto, Trafton había hallado que una banda de absorción del metano a una longitud de onda próxima a un micrometro en el espectro de Titán resultaba inesperadamente intensa. La intensidad de la banda podía deberse al metano en sorprendente abundancia. Otra explicación podía ser que los choques entre las moléculas de metano y las de un gas no detectado perturbasen los estados de vibración de las moléculas de metano, de suerte que éste absorbiera radiación infrarroja a lo largo de un amplio intervalo de longitudes de onda. En cualquiera de los dos casos, la intensidad de la banda de absorción estaría relacionada con la abundancia de metano y con la presión atmosférica local.

Trafton descubrió además que las intensas bandas de absorción del metano en el espectro infrarrojo del satélite ofrecían un aspecto distinto del que presentaban las mismas bandas en los espectros de Júpiter y Saturno. Las de Titán son al mismo tiempo más débiles (menos intensas) y más anchas. Descubrimiento que le sugirió a Trafton la idea de que en la atmósfera de Titán hubiera pequeñas partículas suspendidas en números y a alturas diferentes de las correspondientes a las partículas que constituían las brumas observadas en Júpiter y Saturno. Las partículas difunden la radiación solar hacia la Tierra, incrementando así el brillo de las bandas de absorción. Además difunden la luz según diversos ángulos en la atmósfera de Titán. El aumento de la longitud del camino que recorre un fotón (cuanto de luz) difundido de esta manera hace más probable que el fotón encuentre una molécula de metano y sea absorbido por ella. La probabilidad aumenta para los propios fotones cuya longitud de onda sea ligeramente diferente de la longitud de onda que define el centro de una banda de absorción. (Según la teoría cuántica, tales absorciones son improbables, pero no imposibles.) Así es cómo se ensanchan las bandas.



**OSCURECIMIENTO DE LOS BORDES** que hace que la imagen de un planeta o satélite con atmósfera (*arriba*) se vea en su borde, o periferia, más oscura que en el centro. El oscurecimiento proviene de que la luz reflejada de los bordes atraviesa una mayor longitud de la atmósfera del cuerpo que la luz reflejada del centro. Queda por tanto atenuada en mayor grado por la absorción atmosférica. En contraste, la imagen de un planeta o satélite sin atmósfera (*abajo*) es un disco de brillo más o menos uniforme. En 1908, José Comas sugirió que Titán debía tener atmósfera porque su imagen aparecía oscurecida en los bordes.

## Modelos para Titán

En la Universidad del estado de Nueva York en Stony Brook, Barry L. Lutz, Robert D. Cess y el autor se concentraron en el examen de un nutrido conjunto de espectros de metano hechos en el laboratorio por Lutz, movidos por un afán de conocer mejor los planetas exteriores y el satélite Titán. Descubrimos que la presión no afectaba a las bandas de absorción halladas por Wildt y Kuiper. Cada banda consta de estrechas líneas de absorción espaciadas; cualquier ensanchamiento de las distintas líneas que provoque el aumento de la presión del metano no influirá en la anchura global de la banda. A partir de la intensidad de las bandas, dedujimos la abundancia de metano en Titán. Era equivalente a una columna de metano de unos 120 metros de longitud en CN. Entonces, de la relación propuesta por Trafton entre abundancia y presión, inferimos la presión atmosférica que ensanchaba las bandas del metano en el satélite. (En este análisis despreciamos los efectos de la luz difundida por las partículas.)

El resultado nos sorprendió. Hallamos que la presión en la atmósfera, en la base de la zona que refleja la luz, era de casi 400 milibares, casi la mitad de la presión al nivel del mar en la Tierra, cifrada en torno al bar. El metano por sí mismo daría lugar a una presión de sólo un milibar. La segunda alternativa de Trafton parecía, pues, la correcta: tendría que haber un gas distinto del metano, en gran cantidad.

Mientras tratábamos de deducir la presión en la atmósfera, otros investigadores buscaban explicación a las contradictorias mediciones que se registraban de la temperatura del cuerpo. La primera justificación sostenía que la alta temperatura aparente de Titán, los 165 grados Kelvin que Low había barruntado, seguíase del "efecto de invernadero". Se quiere significar con ello que la atmósfera de Titán es transparente para la luz visible, pero opaca para la infrarroja. De aquí que la luz del Sol penetre hasta la superficie y la caliente; la superficie emite entonces radiación infrarroja, que queda atrapada en la baja atmósfera. Pero tal descripción había quedado en entredicho por la creciente acumulación de mediciones contradictorias, que sugerían que la atmósfera presentaba una estructura desusada, donde las capas superiores se hallaban más calientes que la superficie. La hipótesis del invernadero dejó paso a un modelo definido por Robert E. Danielson y John J. Caldwell, de la Universidad de Princeton.

En ese modelo, el brillo de Titán en el infrarrojo se atribuye a la emisión de

radiación infrarroja por una inversión en la atmósfera, es decir, una capa donde la temperatura de la atmósfera crece con la altura en vez de disminuir. En otros términos: en el modelo, la atmósfera se calienta porque la luz del Sol la absorbe en partículas que constituyen un aerosol (o suspensión de partículas) en la alta atmósfera. La radiación infrarroja detectada en la Tierra es emitida por el metano ($CH_4$) y también por gases tales como el etano ($C_2H_6$) y el acetileno ($C_2H_2$), productos de reacciones químicas inducidas por la luz en las que las moléculas de metano son destruidas por la radiación ultravioleta procedente del Sol. Según un refinamiento posterior del modelo, llevado a cabo por Caldwell, la atmósfera de Titán está constituida por metano en un 90 por ciento. En superficie, su presión es de 20 milibar y, de 86 grados Kelvin, su temperatura; valor este último que se halla en concordancia con el que se obtendría sobre la base del simple calentamiento solar de un cuerpo que estuviera a la distancia del Sol a que se encuentra Titán. Las indicaciones a favor de una presión más alta que la propuesta por Caldwell se podían rechazar fundándose en que la difusión de la luz del Sol por las partículas de aerosol podrían dar a las bandas de absorción del metano la misma apariencia que resultaría del efecto de la presión ejercida por otro gas distinto.

Otro modelo posible es el propuesto por Donald M. Hunten, de la Universidad de Arizona. Hunten señaló que la disociación de las moléculas de amoniaco inducida por la luz en la atmósfera de Titán podía conducir a la acumulación de nitrógeno molecular; el hidrógeno liberado por la disociación escaparía rápidamente del cuerpo. Por ser transparente a la luz visible y a la radiación infrarroja, el nitrógeno no podría detectarse espectroscópicamente desde la Tierra. Sin embargo, Hunten demostró que si la atmósfera de Titán contenía nitrógeno molecular suficiente para contribuir con 20 bar a la presión en la superficie, el aumento de presión resultaría en un aumento de absorción de radiación infrarroja por parte del propio nitrógeno debido a absorción inducida por colisiones. De esta manera, un efecto de invernadero podría calentar la superficie de Titán hasta la temperatura de 200 grados Kelvin, deducida de una de las mediciones realizadas en la banda de radio.

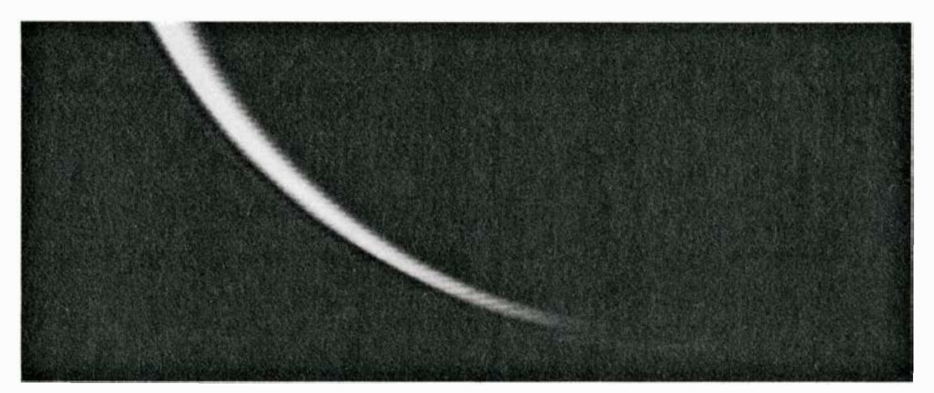
El modelo de Hunten incluía la capa de aerosol y la correspondiente inversión térmica que la hipótesis de Danielson y Caldwell había situado en la atmósfera superior. Fuera de ahí, los dos modelos discrepaban de un modo desazonador. Resumiendo, Danielson y Caldwell proponían que la superficie de Titán gozaba de una temperatura de 86 grados Kelvin y que la atmósfera era en un 90 por ciento de metano; Hunten, por su parte, avanzaba una temperatura en superficie de 200 grados Kelvin y una atmósfera con un 90 por ciento de nitrógeno. Lo peor de todo: Danielson y Caldwell proponían una presión en superficie de 20 milibar y Hunten una de 20 bar, cifra 1000 veces mayor.

Parecía posible que ésta, la más fuerte de las discrepancias, se pudiera reducir e incluso tal vez eliminar a través de mediciones más refinadas del brillo de Titán a longitudes de onda de radio. ¿Por qué tales mediciones? La mayoría de los componentes previsibles en una atmósfera del sistema solar exterior, incluyendo el metano y el nitrógeno, son transparentes a las longitudes de onda de radio. Las mediciones representarían probablemente, pues, la emisión térmica desde la superficie de Titán y no una capa de la atmósfera. Pero éstas encontraban un serio obstáculo: la débil emisión de Titán quedaba enmascarada por la radiación emitida por Saturno. Para paliar la dificultad, Walter J. Jaffe, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, trabajando con Caldwell y el autor, empleó la Gran Distribución de radiotelescopios en Nuevo México. Hicimos observaciones de Titán a tres longitudes de onda en la banda de radio, 1,3, dos y seis centímetros. La Gran Distribución tiene suficiente resolución angular para separar las emisiones de Titán y de Saturno. Observamos que Titán tenía una temperatura en superficie de 87 grados Kelvin más o menos nueve grados. Nuestro resultado permitía tomar en consideración el modelo de Danielson y Caldwell. Y también respaldaba el modelo de Hunten a condición de modificarlo para que el nitrógeno aportara una contribución máxima de dos bar a la presión en superficie. Habíamos reducido la discrepancia, pero sólo hasta la décima parte.

## Exploración del Voyager

Así estaban las cosas en el otoño de 1980 cuando el *Voyager 1* se acercaba al sistema de Saturno. Se sabía que Titán era un gran satélite dotado de una atmósfera tres veces más densa, por lo menos, que la de Marte (donde la presión media en superficie es de siete milibar). La presencia postulada de etano, acetileno y un aerosol a gran altura sugería una gran actividad fotoquímica. El metano se había detectado espectroscópicamente; la presencia del nitrógeno se había propuesto. Thomas W. Scattergood y el autor sugirieron que el color rojo de Titán era una indicación indirecta de que allí había nitrógeno. Scattergood había intentado producir compuestos coloreados bombardeando varias mezclas de gases con protones de alta energía. Pretendía simular el bombardeo de la atmósfera de Titán por partículas subatómicas cargadas y aprisionadas en el campo magnético que rodea a Saturno. Sus esfuerzos no dieron resultado si sólo usaba gas metano. Pero si el gas era mezcla de metano y nitrógeno, el bombardeo provocaba la aparición de una materia pardo-rojiza. Mas, ¿cuánto nitrógeno había en Titán? ¿Qué otros gases coincidían allí?

Los primeros datos de la llegada del *Voyager 1* a la proximidad de Titán fueron imágenes del cuerpo. Decepcionaron bastante. Algunos investigadores habían esperado encontrar claros en la capa de aerosol que permitieran echar un vistazo a la superficie del satélite. Las imágenes sólo revelaron un objeto que recordaba el aspecto felposo de las pelotas de tenis inconsútiles. El aerosol, opaco, lo impregnaba todo. Las



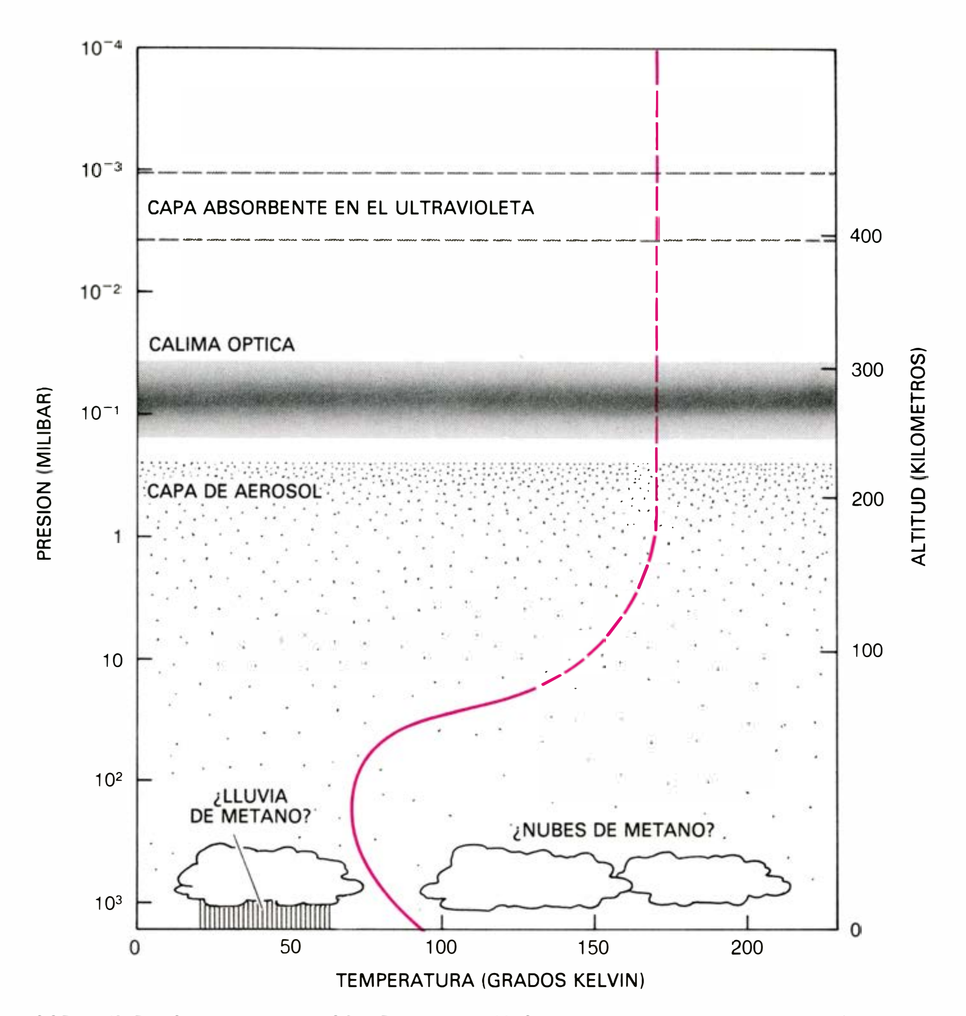
**UN ESTRATO claramente diferenciable formado por la calina constituida por partículas a gran altura sobre Titán aparece en la foto de su polo Sur tomada por el *Voyager 2*. La capa caliginosa es concéntrica con la parte más brillante: la cúspide meridional del creciente iluminado de la capa opaca de aerosol.**

únicas marcas distintivas que se divisaban eran un casquete oscuro rodeando el polo Norte y un brusco cambio de la reflectividad en el ecuador: el hemisferio Sur era decididamente más brillante que el Norte. También se observó que una capa brumosa a gran altura, a unos 100 kilómetros sobre la cima de la capa de aerosol, ceñía al satélite.

Se avanzaron dos explicaciones para la diferencia de reflectividad entre los hemisferios Norte y Sur. En una hipótesis, desarrollada principalmente por Lawrence A. Sromovsky y Verner E. Suomi, de la Universidad de Wisconsin en Madison, se consideraba la diferencia como una manifestación de la variación estacional del calentamiento de la capa de aerosoles por el Sol causada por la inclinación de 26 grados del eje de rotación de Titán respecto al plano del sistema solar. Si esa argumentación es correcta, el hemisferio Sur debe alternar con el hemisferio Norte en presentar mayor brillo. Saturno y sus satélites necesitan 30 años para completar un giro en torno al Sol; de aquí que la alternancia debería producirse una vez cada 15 años.

En otra hipótesis, ideada por G. Wesley Lockwood del Observatorio Lowell, la diferencia resulta de una modulación en la producción de partículas de aerosol causada por los distintos ritmos de llegada de las partículas subatómicas de alta energía del viento solar. A lo largo de los últimos ocho años, Lockwood ha venido registrando pequeños cambios en el brillo neto de Titán. Gran parte de ese tiempo, el número de manchas solares ha estado aumentando y, con ello, intensificándose el viento solar. Las observaciones continuadas de Titán a lo largo de los próximos años, en la porción decreciente del ciclo solar, podrían ayudar a poner a prueba ambas hipótesis. Podrían ser correctas las dos.

Tras las imágenes llegaron otros datos del *Voyager 1*. Por un lado, el espectrómetro ultravioleta a bordo del vehículo espacial reveló, a un grupo dirigido por Lyle Broadfoot, de la Universidad de California del Sur, la presencia de nitrógeno: el instrumento detectó máximos en el espectro ultravioleta de Titán debidos a la emisión de radiación ultravioleta por moléculas de nitrógeno, átomos ionizados de nitrógeno y átomos de nitrógeno no ionizados. El espectro no dio señales de que hubiera monóxido de carbono, argon o neon (otras sustancias que emiten en el ultravioleta). Por otro lado, cuando el espectrómetro analizó la absorción de la luz de una estrella por la atmósfera




**CORTE VERTICAL DE LA ATMOSFERA DE TITAN. Comprende dos capas cuya presencia fue descubierta por el *Voyager 1*. Una capa transparente a la luz visible, donde se absorbe la luz ultravioleta, y bajo ella la capa de calina a gran altura. Por debajo de ésta se encuentra la capa de partículas de aerosol. Se supone que las partículas se están aglomerando para formar partículas mayores que han estado cayendo sobre la superficie a lo largo de la historia del sistema solar. Las nubes de metano y la lluvia de metano se representan encima de la superficie; no están confirmadas pero son probables. La curva que muestra la temperatura en función de la presión (*en color*) se basa en un experimento en el que la atmósfera de Titán quedó interpuesta entre la Tierra y las señales de radio transmitidas por el *Voyager 1*. De acuerdo con los datos acumulados por medio de esta ocultación (junto con los datos Voyager de espectroscopía infrarroja), la temperatura en la superficie de Titán es de unos 95 grados Kelvin y la presión en superficie, de 1500 milibar (1,5 bar). La presión media a nivel del mar en la Tierra rebasa ligeramente el bar.**

de Titán aparecieron indicaciones de la presencia de metano y otros hidrocarburos. Se trataba, en esencia, de un experimento de ocultación, en el cual el borde de Titán, y por consiguiente su atmósfera, se interponían entre la estrella y el espectrómetro.

En un segundo experimento de ocultación, el propio vehículo espacial se constituía en fuente de radiación. Aquí, las radioseñales dirigidas hacia la Tierra por los transmisores del *Voyager 1* se atenuaban por la refracción en la atmósfera del satélite. La atenuación aumentó a medida que el vehículo espacial iba desapareciendo detrás del borde de Titán y aumentaba la densidad de gas atravesado por el haz electromagnético. Con el experimento se pretendía obtener un perfil de densidades, con relación a la altura, en la atmósfera de Titán. El perfil de densidad, a su vez, produce un perfil de $T/\bar{\mu}$ con respecto a la altura, donde $T$ designa la temperatura y $\bar{\mu}$ es la masa molecular media de la atmósfera. El experimento, proyectado por G. Leonard Tyler, de la Universidad de Stanford, debía dirimir entre los dos principales modelos de la atmósfera de Titán: el de Danielson y Caldwell o el de Hunten.

El resultado favoreció al de Hunten. En particular, Von R. Eshleman, de la Universidad de Stanford, indicó que el perfil de $T/\bar{\mu}$ producido por el experimento concordaba muy estrechamente con las predicciones del modelo de Hunten para una atmósfera rica en nitrógeno, si exceptuamos que el perfil conducía a una presión en superficie más baja que el valor original de Hunten de 20 bar. El grupo responsable del experimento de ocultación continúa analizando los datos. Gunnar F. Lin-

dal, del Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California, ha presentado el informe más reciente de este grupo: en él se dice que la presión en superficie es de 1,5 bar (más o menos 0,1) y, próxima a 94 grados Kelvin, la temperatura en superficie. Lindal ha presentado también un valor de 2575 kilómetros (más o menos dos) para el radio de Titán, deducido de la ocultación.

Mediante un espectrómetro de infrarojo se analizó la estructura de la atmósfera por un grupo dirigido por Rudolf A. Hanel, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). El mejor ajuste mutuo de los datos de ocultación y de los datos en infrarrojo señala un valor de 28,6 para la masa molecular media de la atmósfera; de aquí que ésta deba albergar una cantidad apreciable de un gas más pesado que el nitrógeno. (La masa molecular del nitrógeno es de 28,0.) Para Robert E. Samuelson, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, el gas sería argon. En su opinión y en la de sus colegas se trata de un elemento que abunda bastante en el universo y que es gaseoso a la temperatura que reina en Titán. Además, el argon (como el nitrógeno) es transparente en el visible e infrarrojo próximo, de modo que escapa a la detección por espectroscopía infrarroja.

El hecho de que el argon no fuera detectado por el espectrómetro ultravioleta a bordo del *Voyager 1* significa sólo que su abundancia en la atmósfera superior no llega al 6 por ciento. Es de esperar que los gases ligeros dominen aquí. El límite del 6 por ciento en la atmósfera superior de Titán no descarta, pues, la abundancia neta de alrededor del 12 por ciento requerida para conferir a la atmósfera una masa molecular media de 28,6. Haciendo $\bar{\mu}$ igual a 28,6 en el perfil de $T/\bar{\mu}$ se encuentra una temperatura en superficie de 95 grados Kelvin más o menos dos grados.

Los datos transmitidos a la Tierra desde la proximidad de Titán por el *Voyager 1* nos revelan un satélite del sistema solar exterior cuya atmósfera, como la de la Tierra, es rica en nitrógeno. Además, los datos muestran que su atmósfera tiene una presión en superficie mayor que la correspondiente a nuestro planeta. La presión en superficie de la atmósfera de un cuerpo representa tanto la cantidad de gas en la atmósfera como el grado de compresión a que está sometida por la gravitación del cuerpo. Sorprendentemente, la presión en superficie de Titán (1,5 bar según los datos del Voyager) significa que su atmósfera tiene unas 10 veces más gas por unidad de superficie que la propia terrestre.

El espectrómetro infrarrojo instalado en el *Voyager 1* registró también bandas de emisión producidas por varias sustancias gaseosas de cuya presencia en Titán no se tenía confirmación. La primera en identificarse fue el cianuro de hidrógeno (HCN), sustancia que quizás intervino en las reacciones químicas que condujeron a la síntesis de ciertos compuestos, así la adenina, en la Tierra hace tres mil millones de años. La adenina es un constituyente del ácido desoxirribonucleico (ADN), imprescindible, pues, para la vida aquí. En estudios posteriores, Vigil Kunde y William Maguire, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales, y sus colaboradores, compararon los espectros infrarrojos de Titán con espectros de laboratorio que habían elaborado a tal efecto. Las comparaciones condujeron a la rápida identificación de seis sustancias más en la atmósfera de Titán; entre ellas: hidrocarburos, así el propano ($C_3H_8$), y compuestos nitrogenados, tal el cianoacetileno ($HC_3N$). Darrell F. Strobel, del Laboratorio Naval de Investigación, ha demostrado que esas sustancias pueden proceder de reacciones en que tomen parte el metano y el nitrógeno, impulsadas por el bombardeo de la atmósfera de Titán por fotones ultravioleta del Sol y por electrones de alta energía aprisionados en el campo magnético de Saturno.

**ESPECTROS DE SATURNO Y TITAN hechos por Robert G. Danehy y el autor con la ayuda del telescopio de 2,7 metros en el Observatorio McDonald de Texas. Las longitudes de onda del azul en la luz visible se hallan a la izquierda de la escala; las del extremo rojo, a la derecha. Se observan varias bandas de absorción. La situada a 6190 unidades angstrom y la próxima a 7200 angstrom se cuentan entre las que condujeron a la identificación del metano gaseoso ($CH_4$) en Titán. Una banda menos prominente cerca de 6450 angstrom revela amoniaco gaseoso ($NH_3$) en Saturno, pero no en Titán. En general, las más intensas bandas de absorción en los espectros del satélite Titán son menos intensas y más anchas que las de los espectros en los planetas Júpiter y Saturno. Se cree que la razón es la difusión de la luz por las partículas de aerosol de Titán. Los dos espectros de la parte superior presentados aquí se han dividido por un espectro de la luz reflejada por la Luna terrestre. De esta manera, las líneas espectrales normalmente presentes en la luz solar se han reducido a un valor unidad, evitando así confundirlas con líneas espectrales de Titán. El espectro de la parte inferior, de Titán, no se ha corregido en ese sentido. Muestra, pues, líneas espectrales causadas por la absorción de la luz en la atmósfera del Sol o en la de la Tierra.**

## La superficie de Titán

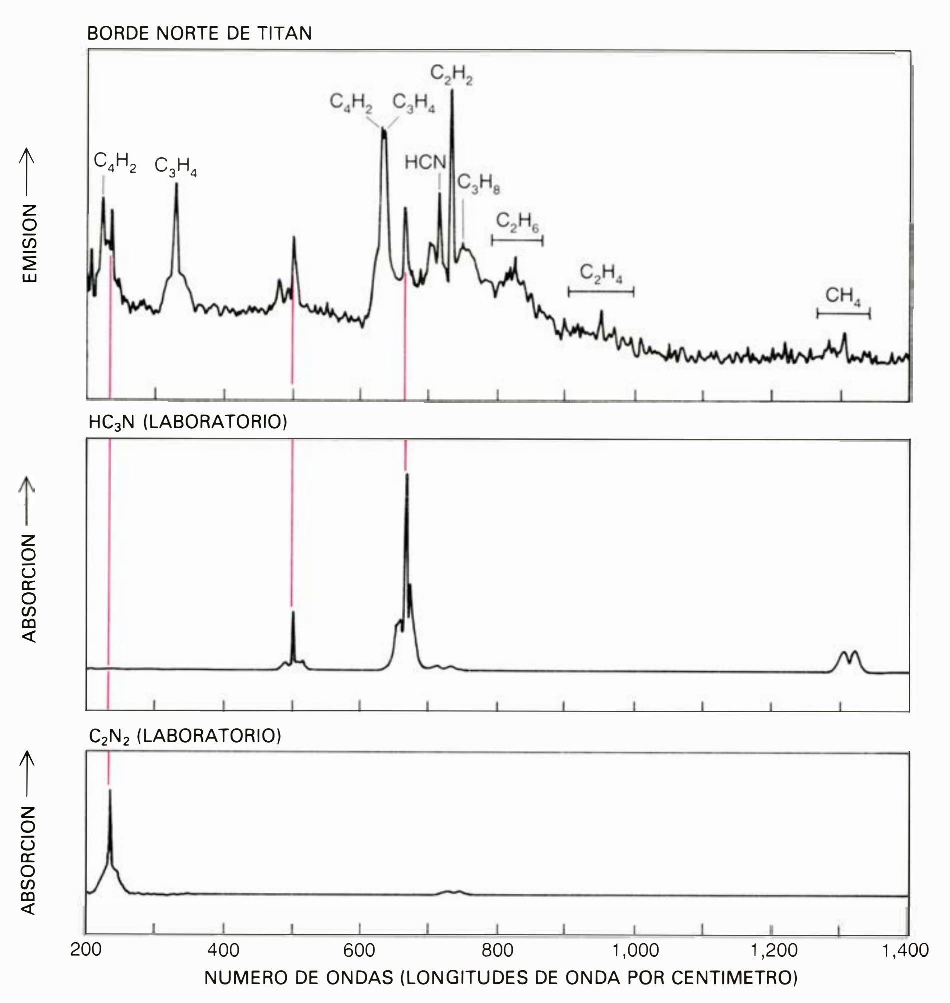
Parece ya indiscutible que la primitiva especulación respecto al origen del

aerosol de Titán era esencialmente correcta. Los fragmentos moleculares y los compuestos producidos por el impacto de fotones ultravioleta y de electrones de alta energía forman polímeros o cadenas moleculares. Quedan así suspendidas, en forma de partículas sólidas, en la atmósfera. Estudiando cómo las partículas de aerosol reflejan la luz solar, James B. Pollack y Kathy Rages, del Centro de Investigación Ames de la NASA, demostraron que las variaciones en el brillo de Titán con la variación del ángulo entre el Sol y Titán y cada uno de los vehículos espaciales Voyager admitían explicación en el caso de que las partículas de aerosol en la alta atmósfera tuvieran un radio medio de 0,5 micrometros.

Se puede especular que esas partículas van sedimentándose lentamente y a medida que caen, chocan y se sueldan. Los conglomerados caen más deprisa. En consecuencia, la atmósfera pierde constantemente las moléculas carbonadas y nitrogenadas producidas por procesos que tienen lugar a gran altura por encima de la superficie de Titán. Stroebel ha estimado que, a lo largo de la edad del sistema solar, se ha depositado sobre la superficie del satélite una cantidad de hidrocarburos que equivaldría a una capa de 0,1 a 0,5 kilómetros de espesor. Junto a ella se ha producido un depósito de compuestos nitrogenados equivalente a una capa de varias decenas de metros de espesor.

¿Cuál es la naturaleza de la superficie sobre la que cae este maná del cielo (como gusta de llamar a este material Carl Sagan, de la Universidad Cornell)? Análisis refinados de los datos del *Voyager 1* sitúan la temperatura en superficie de Titán en 94 grados Kelvin, más o menos un grado. Las mediciones realizadas por el espectrómetro de infrarrojo a bordo del *Voyager 1* sugieren que la temperatura en superficie no varía en más de tres grados entre el ecuador y los polos. Débese ello a la ubicuidad de la densa atmósfera, fuertemente absorbente de la luz. Estos valores de la temperatura en superficie permiten la presencia de metano líquido. La verdad es que hacen muy plausible que el satélite esté cubierto por un océano líquido global de lo que en la Tierra llamamos gas natural.

El metano puede desempeñar allí, pues, el mismo papel que el agua representa aquí. En la superficie de Titán, el metano es líquido. En la baja atmósfera es gaseoso. Quizás su baja atmósfera incluye nubes de metano, y cabe también que llegue a saturarse en uno u otro lugar y se produzca una lluvia de metano. Todo apunta así hacia la existencia de un mundo, más allá de la Tierra, cuya superficie está dominada por un abundante compuesto en su forma líquida. ¡Qué lástima que el astronauta que allí se acercara haya de enfrentarse a una temperatura que ronda los 94 grados Kelvin, es decir, −179 grados Celsius!




**ESPECTROS HECHOS POR EL VOYAGER 1 en la parte infrarroja del espectro electromagnético. Posibilita la identificación de varios gases distintos del metano en la atmósfera de Titán. En este caso, la identificación del cianoacetileno ($HC_3N$) y del cianógeno ($C_2N_2$) queda demostrada por comparación de espectros de absorción hechos en el laboratorio con un espectro de emisión de Titán realizado por el vehículo espacial. El cotejo es válido: las moléculas de un gas determinado absorben y emiten la radiación para el mismo conjunto de longitudes de onda características. Algunos rasgos espectrales de otros gases identificados por comparaciones análogas se han registrado en el espectro de Titán. Para los tres espectros, la escala horizontal representa número de ondas, u ondas por centímetro. Un número de ondas de 200 corresponde a una longitud de onda de 500.000 angstrom; un número de 1400 corresponde a una longitud de onda de aproximadamente 71.000 angstrom. El espectrograma fue realizado por un grupo dirigido por el profesor Rudolf Hanel, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, de la NASA.**

¿Qué sensación se tendría aposentado a bordo de un bote en el mar de metano que ciñe a Titán? La visibilidad horizontal sería muy buena. Según O. Brian Toon, del Centro de Investigación Ames, las macropartículas de aerosol que caerían de la atmósfera serían escasas y muy dispersas. La visibilidad disminuiría, naturalmente, en un temporal de lluvia de metano. Por otro lado, la luz sería enteramente crepuscular. Saturno dista del Sol casi 10 veces más que la Tierra. Lo que reduce, por si mismo, a una centésima parte la llegada de luz por unidad de superficie. Débil luz que se atenuará todavía más por la capa de aerosoles y por las nubes de metano que el azar interponga. Es difícil estimar cuánto valdrá la atenuación neta. Algunos de los modelos de Toon predicen que la vista desde el bote se asemejaría a la de una noche de luna en la Tierra, suponiendo incluso que fuera mediodía en Titán. No resultaría fácil navegar por su mar. Ni el Sol ni las estrellas se verían. De nada nos serviría la brújula: los vehículos espaciales no detectaron campo magnético.

¿Qué tipo de embarcación habría que preparar? Tal no fuera idóneo el velero, pues se presumen vientos flojos en la superficie del satélite. No hay, en efecto, bruscas diferencias de temperatura de un lugar a otro, diferencias que son las que impulsan los vientos en la Tierra. ¿Podría confiarse, entonces, en un bote con motor fuera de bordo? Observamos aquí un con-

traste curioso. En la Tierra, el oxidante para un motor de combustión interna está a disposición de todos en la atmósfera. En Titán, el bote flotaría sobre un mar de combustible; escasearía, por contra, el oxidante. Quizás pudiera recabarse perforando el interior de Titán hasta llegar al hielo, de donde extraer el oxígeno. O tal vez haya continentes allí formados por afloramientos de hielo recubiertos por una capa de hidrocarburos y polímeros nitrogenados procedentes de la capa de aerosoles.

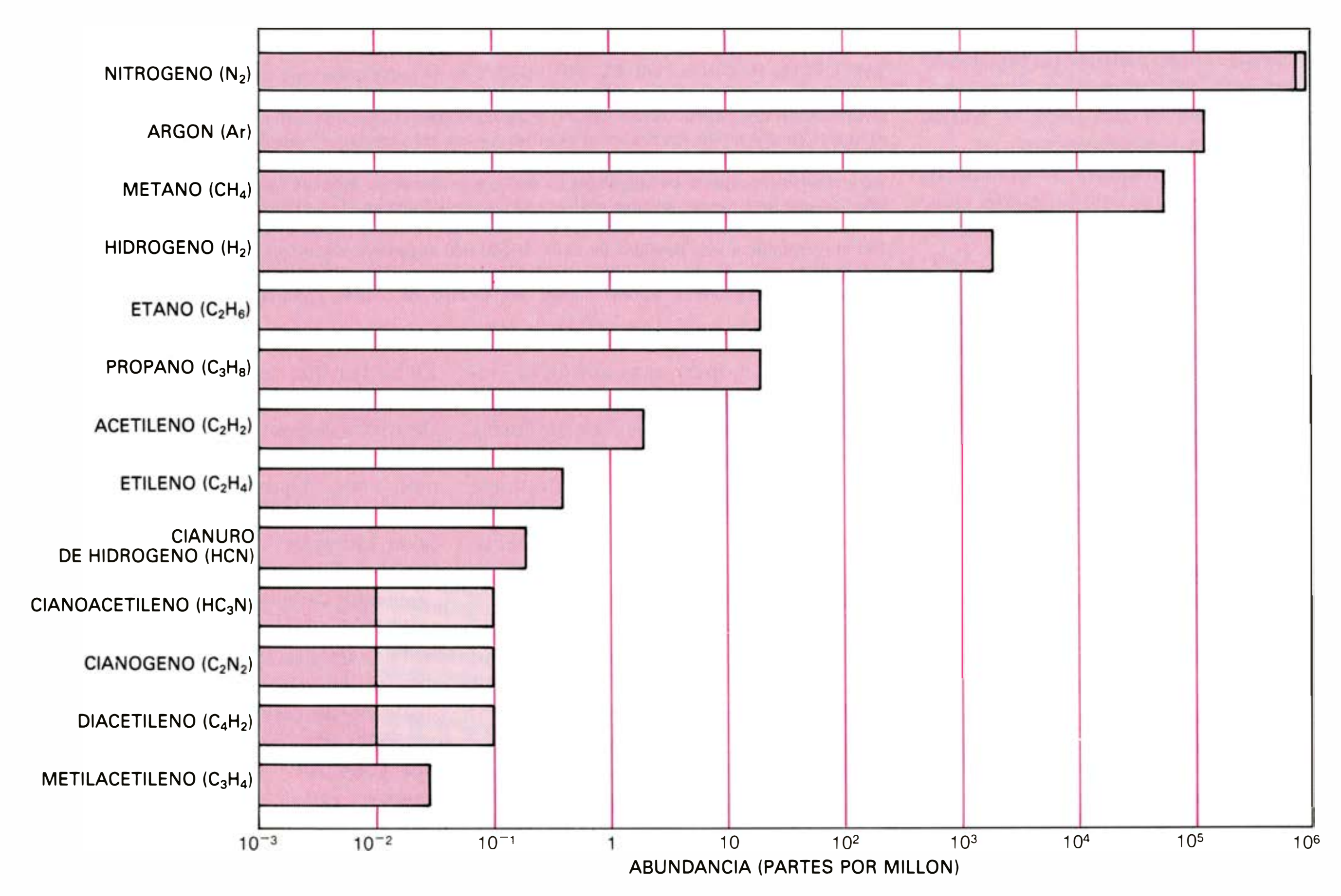
## Cómo se formó la atmósfera

Las misiones Voyager han de servirnos también para conocer la forma en que se desarrolló esa curiosa atmósfera de Titán. Nos enfrentamos, en particular, con un cuerpo de donde escapó el hidrógeno, según dedujera Jeans hace ya 65 años. En este respecto, el satélite Titán coincide con los planetas interiores del sistema solar. ¿Por qué, entonces, no desarrolló una atmósfera como la de Marte o Venus, rica en dióxido de carbono? La razón estriba en que el oxígeno no está disponible: se encuentra aprisionado en el hielo del interior sólido del satélite. La combinación única de tamaño y temperatura de Titán ha permitido que se forme, y se mantenga, una atmósfera, reductora sin embargo.

Se acepta generalmente que Titán se formó en una protonebulosa saturniana, una parte aislada de la nube de gas y polvo que inició el sistema solar. Parece también razonable considerar que se formó junto con Saturno, sus anillos y los demás satélites del planeta hace 4500 millones de años. La densidad de Titán medida hoy (1,9 gramos por centímetro cúbico) indica que está constituido aproximadamente por un 52 por ciento de rocas y un 48 por ciento de hielos. Las proporciones representan un ligero enriquecimiento en rocas comparado con la composición global del sistema solar. Sin embargo, el hielo hubo de ser crucial para la subsiguiente evolución de la atmósfera de Titán, al atrapar, verosímilmente, gases de la nebulosa protosaturniana en mucho mayor grado que lo hubiera hecho la roca.

Hace veinte años, Stanley L. Miller, de la Universidad de California en San Diego, predijo que los satélites de hielo de Saturno debían incluir hidrato de metano ($CH_4.7H_2O$), esto es, metano ocluido en hielo de agua. La presencia conocida del metano en la atmósfera de Titán apoyaba esta idea. La ocurrencia, recientemente descubierta, de varios gases adicionales sugiere que también éstos se hallan atrapados en forma de hidratos. Para predecir con seguridad qué sustancias se encuentran aprisionadas, deben conocerse los valores de presión y temperatura para los cuales una sustancia dada y su hidrato se mantienen en equilibrio. (En el equilibrio, la velocidad con que las moléculas o átomos de una sustancia escapan del hidrato es igual a aquella con que son atrapados, y así la cantidad de hidrato no disminuye y el hidrato es estable.) Se cree que la temperatura de la nebulosa protosaturniana no descendió muy por debajo de 60 grados Kelvin. A esa tempertura, la presión de equilibrio para las moléculas de nitrógeno o los átomos de argon y sus respectivos hidratos es inferior a $10^{-7}$ bar.

La presión de $10^{-7}$ bar es inferior a la presión con que el nitrógeno o el argon contribuyeron probablemente a la de la nebulosa protosaturniana; por tanto, esos gases debieron de quedar aprisionados en los hielos. Por otra parte, la presión de equilibrio para los átomos




**SE CREE QUE LOS GASES de la atmósfera de Titán varían en abundancia desde el nitrógeno molecular (establecido en 82 a 94 por ciento de la atmósfera, u 820.000 a 940.000 partes por millón según los resultados de los datos suministrados por el Voyager) hasta trazas de hidrocarburos, así el metilacetileno y sustancias nitrogenadas como el cianógeno. Quizá nos quede por descubrir aún otros componentes de su atmósfera en cantidades traza. El diagrama revela aproximadamente 12 por ciento (120.000 partes por millón) de argon inerte. Doce por ciento que es el exigido para elevar la masa molecular de los gases que constituyen la atmósfera de Titán hasta el valor de 28,6 que provisionalmente se ha deducido de los datos suministrados por los Voyager.**

de neon y su hidrato a 60 grados Kelvin es de casi 40 bar. El neon presenta una alta abundancia cósmica; por consiguiente, la ausencia de cantidades detectables de él en la atmósfera de Titán significa dos cosas. En primer lugar, el neon no pudo estar atrapado en forma de hidrato; en segundo lugar, no pudo estarlo en forma gaseosa. Esto es, la gravitación de Titán, en su fase de gestación, carecía de intensidad suficiente para atrapar directamente el neon a partir de la nebulosa protosaturniana. (La masa atómica del isótopo más abundante del neon es 20, o cuatro unidades más que el límite superior establecido por la teoría de Jeans para el escape de Titán con su presente masa.) La ausencia del neon tiende a confirmar que la atmósfera se formó tras la aglomeración del propio cuerpo y que aquella se desarrolló a partir de gases atrapados en forma de hidratos.

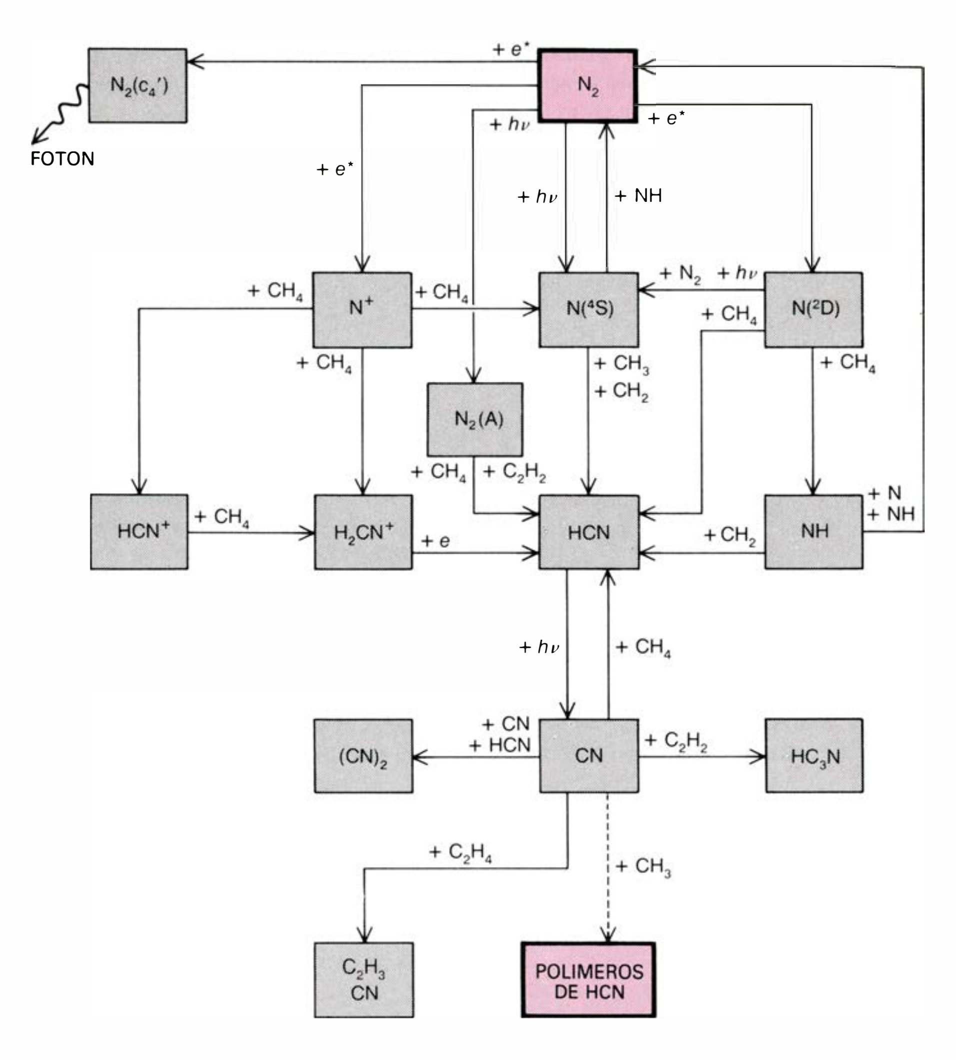
¿Cómo escaparon los gases de los hidratos y alcanzaron la superficie? En primer lugar, la liberación de energía potencial gravitatoria en forma de calor al aglomerarse Titán debió bastar para sublimar una fracción de los hielos en el cuerpo. Más tarde, la desintegración de núcleos radiactivos en el interior del satélite se convertiría en la fuente principal de calor dentro de él. Según modelos propuestos por Mark Lupo y John S. Lewis, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, el calentamiento radiactivo pudo ser suficiente para crear una zona de agua líquida a gran profundidad en el manto del cuerpo. Los gases pudieron escapar del líquido.

Hay vías, pues, que explican cómo a través de ellas los gases que en un tiempo estuvieron atrapados en los hielos de Titán pudieron escapar y formar una atmósfera. Se encuentran indicaciones de tal escape en otros satélites de Saturno. El ejemplo más evidente lo tenemos en las fracturas de Dione, bordeadas por materia más brillante que el terreno circundante. Dione era simplemente demasiado pequeña para retener una atmósfera. Otros satélites de Saturno muestran signos de superficies renovadas. El material extrovertido del interior de los satélites pudo venir impulsado desde el interior hasta la superficie, debido, en parte, a la presión interna de gases que escapaban de los hidratos.

El nitrógeno de la atmósfera de Titán merece un examen detenido. En los sucesos que hemos venido describiendo, se ha supuesto que el nitrógeno de la atmósfera actual se incorporó al Titán en aglomeración, en forma de hidrato. Esta hipótesis requiere a su vez que la forma dominante del nitrógeno en la nebulosa protosaturniana fuese molecular ($N_2$), lo que quizá no fue el caso. Ronald G. Prinn, del MIT, se ha sumado a Lewis en la defensa de la hipótesis que sostiene que el $N_2$ era la forma estable del nitrógeno en el sistema solar incipiente. Prinn y M. Bruce Fegley, Jr., del MIT, indican, no obstante, que el aumento de temperatura cerca de los incipientes Júpiter y Saturno pudo permitir la formación de amoníaco ($NH_3$). Si así fue, y si Titán lo atrapó en forma de hidrato en lugar de aprisionar el $N_2$, la historia ulterior de Titán debió seguir un derrotero muy distinto.

De los cálculos realizados por Sushil K. Atreya y sus colaboradores de la Universidad de Michigan se desprende la necesidad de postular una época "caliente" en la primitiva historia de Titán, en que la temperatura en superficie excedió los 150 grados Kelvin. Durante toda esta época, el amoníaco habría escapado desde el interior hasta la atmósfera, donde lo habrían destruido fotones solares ultravioleta. De esta manera, la atmósfera habría perdido su amoníaco y ganado el $N_2$ que hoy tiene. No puede descartarse una temperatura de 150 grados Kelvin; en principio, habría podido producirla un efecto de invernadero debido al hidrógeno y amoníaco en la primitiva atmósfera de Titán. Pese a ello, la época caliente es una complicación que se evitaría si el nitrógeno hubiera quedado atrapado por Titán en forma de hidrato en $N_2$. Tal vez actuó una combinación de ambos procesos, con lo que no sería necesario forzar tanto la primitiva temperatura en superficie.

El argon de la atmósfera de Titán




**QUIMICA DEL NITROGENO** en la atmósfera de Titán, según la hipótesis avanzada por Darrell F. Strobel, del Laboratorio de Investigación Naval. Se muestran aquí los principales cuerpos reaccionantes y productos de reacción; se omiten, entre otros, los átomos y moléculas de hidrógeno. Las reacciones iniciales llevan consigo la rotura del enlace N-N de una molécula de nitrógeno en la parte alta de la atmósfera. La energía para romper el enlace se recaba del impacto de la radiación solar ultravioleta ($h\nu$) o de un electrón de alta energía ($e^*$) atrapado cerca de Titán por el campo magnético de Saturno. (Este segundo proceso proporciona a la atmósfera del satélite Titán 10 veces más energía que el primero.) Las reacciones finales incluyen la formación de las partículas rojizas de aerosol observadas en la atmósfera de Titán. No se conocen bien las fases finales porque la composición química de las propias partículas no está aún establecida. Se sabe, sin embargo, que el cianuro de hidrógeno (HCN) puede formar un polímero pardo-rojizo. En la ilustración, $^2D$ y $^4S$ representan estados atómicos excitados, A y $c_4'$ designan estados moleculares excitados y *e*, un electrón liberado en la atmósfera por la radiación solar ultravioleta.

merece también nuestra atención. Si constituye el 12 por ciento de la atmósfera, procederá de hidratos atrapados. La única alternativa restante es que halle su origen en desintegraciones radiactivas. Más del 99 por ciento del argon que almacena la atmósfera terrestre se produjo así, precisamente; provino de la desintegración del isótopo radiactivo potasio 40 en argon 40. Aun cuando el material rocoso del satélite guardara la misma proporción de potasio que el material rocoso de la Tierra, el contenido actual de argon 40 en la atmósfera de Titán se cifraría en unas 70 partes por millón, valor muy alejado del 12 por ciento previsto, que correspondería a 120.000 partes por millón. El argon de la atmósfera de Titán debe ser realmente argon primordial, atrapado en forma de hidrato a partir de la nebulosa protosaturniana. Se tratará, pues, del isótopo 36 con una mezcla de 20 por ciento de argon 38.

Las presiones de equilibrio del nitrógeno y argon con respecto a sus hidratos son lo suficientemente similares y bajas para sugerir que las proporciones en las que quedaron atrapados en forma de hidratos coincidirían, a grandes rasgos, con las proporciones a las que escapan luego de esos hidratos. La comprobación de la presencia de nitrógeno, en lugar de amoniaco, en la nebulosa protosaturniana comienza, por tanto, calculando la cantidad de nitrógeno que ha escapado de la parte sólida de Titán. La estimación incluirá el contenido de nitrógeno de su atmósfera actual y considerará cuánto nitrógeno escapó al espacio y cuánto se incorporó en las partículas de aerosol a lo largo de la historia del satélite. De los cálculos de Strobel para esas dos vías de merma se deduce que la cantidad total de nitrógeno que ha penetrado en la atmósfera se cifra en torno a 1,7 veces el actual contenido de nitrógeno, es decir, el 140 por ciento del contenido total de la atmósfera de Titán.

Cuesta menos calcular la cantidad de argon que escapó de la parte sólida del satélite. Además de su carácter inerte (no se combina para formar compuestos químicos), el argon es demasiado pesado para escapar a la atmósfera en cantidades apreciables: de la parte sólida ha huido sólo el 12 por ciento de la atmósfera. La relación de nitrógeno a argon es pues de 11,7. La relación de nitrógeno a argon en la nube de materia que se convirtió en el sistema solar no difería mucho: valía 11.

¿Qué puede enseñarnos Titán sobre la primitiva Tierra? La opinión de la comunidad científica se está apartando de la hipótesis de una Tierra que comenzó con una atmósfera fuertemente reductora, compuesta sobre todo de metano, amoníaco, hidrógeno y vapor de agua. La idea moderna se inclina por esta otra explicación: la atmósfera era ligeramente reductora al principio y constaba principalmente de dióxido de carbono, nitrógeno molecular y monóxido de carbono con no más de un 10 por ciento de hidrógeno. Sin embargo, en lo que hay pleno acuerdo es en que no existía oxígeno libre, pues un ambiente oxidante hace extremadamente difícil la formación de moléculas orgánicas. En un ambiente oxidante, el carbono queda bloqueado de inmediato en moléculas no mayores que el dióxido de carbono.

Ciertos investigadores, trabajando en laboratorios en la Tierra, han sometido las mezclas gaseosas de metano, amoníaco, hidrógeno y vapor de agua a descargas eléctricas repetidas. Han conseguido producir, entre otras moléculas orgánicas, algunas de las que constituyen el ADN. Lo que no les ha sido posible producir es algo semejante al propio ADN, o, más generalmente, una molécula capaz de producir réplicas de sí misma actuando como falsilla para la construcción de un duplicado a partir de las moléculas más sencillas que estén a disposición. El problema parece ser, en frase de Andrew Marvell, falta de "suficiente universo y tiempo". Un tubo de ensayo es simplemente demasiado pequeño y los años un intervalo muy breve para que sea probable la llegada de una molécula autoduplicadora.

## Titán como laboratorio

Mas he aquí que Titán ofrece, a este respecto, lo que equivale a un inmenso laboratorio natural, libre de predisposiciones experimentales, o sesgos, y de la posibilidad de catálisis o inhibición experimental de reacciones químicas por las paredes de los recipientes de reacción o la grasa de las llaves de paso en un sistema de vacío. Se trata, además, de un laboratorio donde los productos de reacción a lo largo de la historia del sistema solar se han agrupado en partículas de aerosol que descansan a baja temperatura sobre la superficie del cuerpo, y donde un día podremos estar en condiciones de examinarlas tranquilamente. Cabe pensar en que llegue el momento en que decidamos realizar experimentos nosotros mismos allí. El calentamiento de algunas hectáreas de Titán produciría mayor cantidad de la "sopa primitiva" que todos nuestros experimentos terrestres podrían lograr en varias vidas.

Por ahora, la NASA está contemplando una misión para el decenio de 1990 que enviaría una sonda a la atmósfera de Titán mientras que el vehículo espacial nodriza estaría en órbita alrededor de Saturno, empleando radar para perforar la opacidad de la atmósfera de Titán y cartografiar su superficie. Y es de esperar que mucho antes de esa fecha sepamos más de Titán a través de un análisis detenido de los datos que nos ofrezcan los Voyager, y a partir de los nuevos y poderosos espectrómetros ahora accesibles en la Tierra, en particular de los instrumentos que se pondrán en órbita alrededor de la Tierra con el telescopio espacial en 1985.

Mientras tanto, los Voyager continúan sus misiones de exploración. El *Voyager 1* está en camino hacia el exterior del sistema solar. Si sus transmisores continúan funcionando, podemos esperar que nos dé la posición de la frontera entre el viento solar y el tenue gas del medio interestelar. Las noticias llegarán dentro de los próximos 10 años. El *Voyager 2*, camino de Urano, alcanzará este planeta en enero de 1986, y en agosto de 1989, Neptuno. El mecanismo que apunta las cámaras del vehículo espacial sufrió ciertos daños cuando el vehículo atravesó los anillos de Saturno. Los ingenieros del Laboratorio de Propulsión a Chorro confían, sin embargo, en que el *Voyager 2* transmita valiosos datos de Urano y Neptuno si no se producen ulteriores averías.

La verdad es que los Voyager no estaban proyectados para llegar hasta planetas más allá de Saturno, ni su instrumentación es adecuada para trascenderlo. El cambio de planes se realizó a mediados del decenio de 1970, cuando se vio claramente que no se iban a emprender misiones a Urano y Neptuno en un decenio por lo menos. Habida cuenta del éxito obtenido por el programa Voyager resulta irónico que nos encontremos sin misiones a la vista, aparte de una que puede ser anulada: el proyecto Galileo, que enviaría una sonda a la atmósfera de Júpiter para medir composición, presión y temperatura. Hemos perdido ya la oportunidad de enviar una misión al cometa Halley. Estamos regresando a comienzos del siglo XVII, cuando el planeta más distante conocido era Saturno y no se comprendía que los cometas atravesaran el sistema solar. No es este el momento para tal retorno. Queda mucho por aprender sobre los mundos que nos rodean antes de conocer entera la historia del sistema solar y de la propia Tierra.

# Química de las llamas

*La investigación en el campo de la química de la combustión se centra en las sustancias intermedias creadas a partir de combustibles hidrocarbonados, que, una vez quemados, producen dióxido de carbono, agua y microcontaminantes*

William C. Gardiner, Jr.

La investigación científica empeñada en desvelar la naturaleza del fuego tuvo su descubrimiento crucial en 1774, cuando Antoine Laurent Lavoisier cayó en la cuenta de que la aparente desaparición de materia en las llamas era mera ilusión. Lavoisier demostró que, a altas temperaturas, un componente invisible del aire (que más tarde llamaría oxígeno) reaccionaba químicamente con la materia, proporcionando calor y varios productos de combustión. Idea que todavía sirve para definir un combustible: sustancia que puede participar en una reacción exotérmica (liberadora de calor) con oxígeno.

La ciencia de la combustión ha adquirido una significación adicional en los últimos años. Nos referimos a la conciencia que ha ido tomando la gente de la reserva limitada de combustibles fósiles de bajo coste, así como de los efectos perjudiciales que algunos productos de la combustión inducen en el medio ambiente y la salud humana. Modernas técnicas de laboratorio permiten hoy detectar no sólo los productos finales de los procesos de combustión, sino también muchas sustancias que aparecen transitoriamente en el proceso de quemado. El objetivo práctico de este trabajo sigue siendo el mismo que guiaba al hombre prehistórico: cómo quemar combustible de la manera más barata, más eficiente, más completa y más limpia posible.

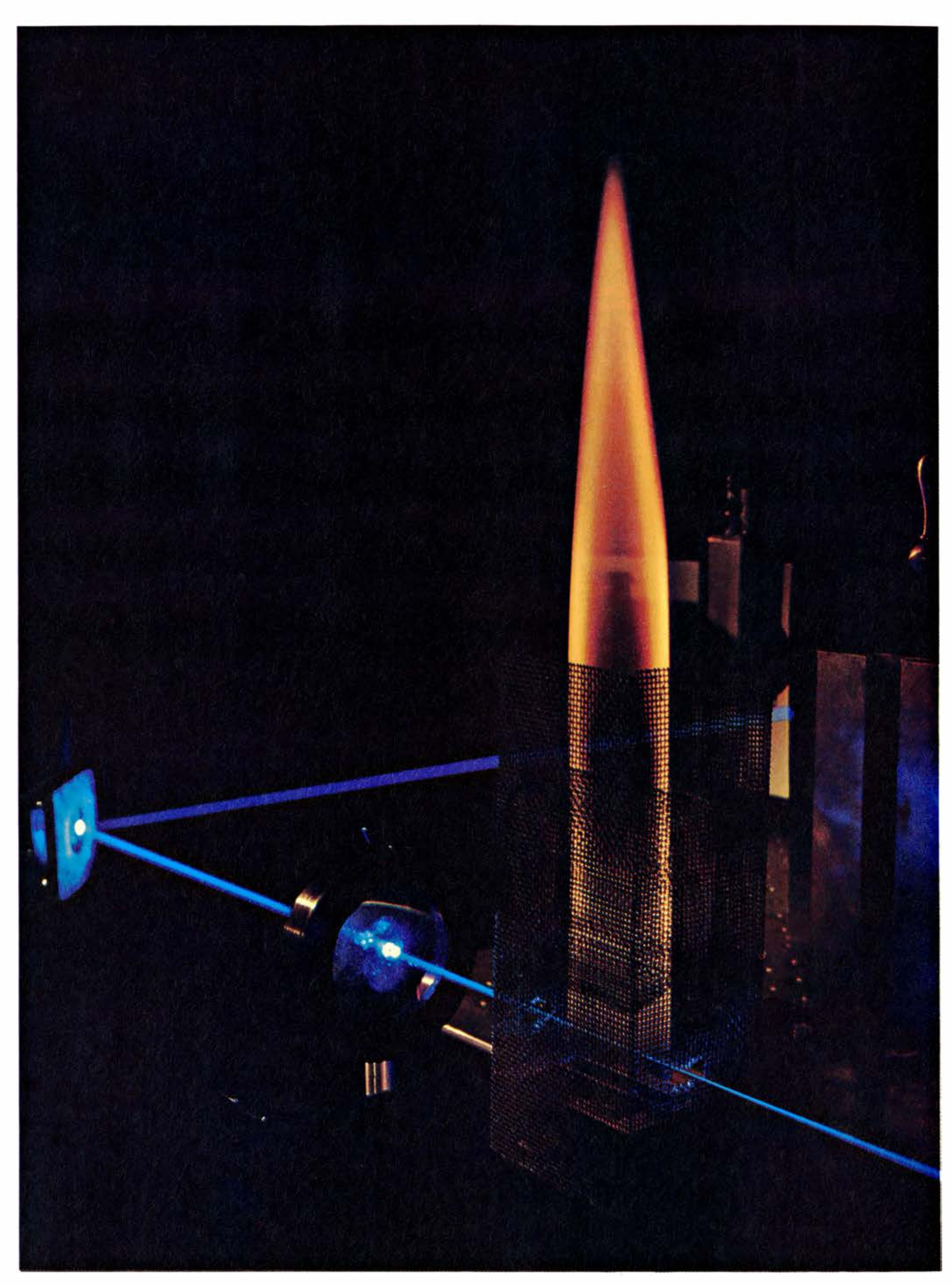
Hay combustibles, la madera y el estiércol de camello, por ejemplo, que encierran una complejidad excesiva para abordarlos con detalle a nivel molecular. Otros, así el aluminio o el amoníaco, requieren más energía para su combustión que la que ellos liberan al quemarse; se considera, pues, inadecuada su capacidad combustible. Los científicos dedicados a los fenómenos de combustión estudian, en primer lugar, los combustibles que más a menudo se utilizan como fuentes de energía: carbón, productos petrolíferos y gas natural. No se trata, empero, de sustancias químicas puras. El carbón, compuesto principalmente por carbono elemental, contiene otros muchos componentes, combustibles y no combustibles. Los combustibles petrolíferos y el gas natural son mezclas de hidrocarburos (compuestos formados por carbono e hidrógeno en una relación aproximada de dos a uno) con trazas de otras sustancias. Además de la combustión de éstos, los químicos estudian combustibles menos comunes para usos especiales: acetileno para llamas de soldadura, metales en polvo para fuegos artificiales e hidrógeno para motores de cohetes.

Que los combustibles "se quemen" no significa que lo hagan en un proceso espontáneo. Una mezcla de acetileno y oxígeno, por ejemplo, puede mantenerse durante cientos de años sin que se perciba reacción alguna. Pero si exponemos la mezcla a una llama o a una chispa, detona en un microsegundo. El profano da una explicación simple: primero hay que encender el fuego, que luego ya se sustentará a sí mismo hasta que el combustible o el oxígeno se agoten, o hasta que lo apaguen. Compete a la ciencia de la combustión establecer las nociones básicas de la ignición, propagación y extinción en términos físicos y químicos precisos. Llevar a cabo esa tarea requiere más datos que los que proporciona la mera identificación de la reacción implicada en una llama.

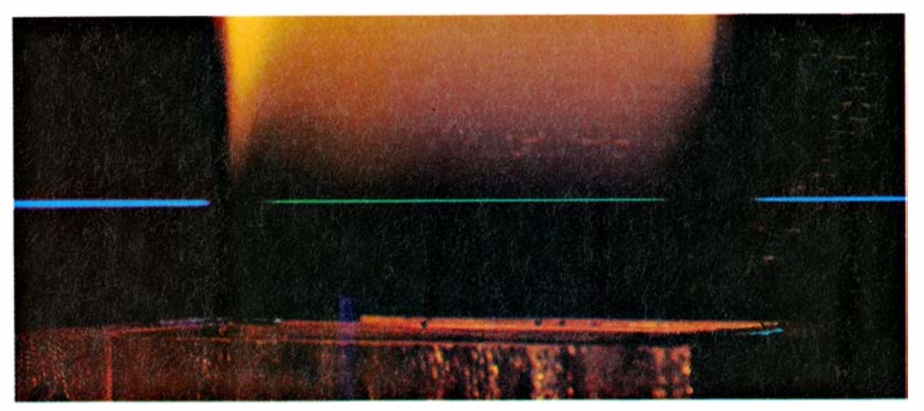
Los primeros químicos dedicados a estudiar la combustión creían que el cambio de temperatura explicaría por sí mismo el fenómeno de ignición y propagación. Consideraban, sencillamente, que las reacciones químicas implicadas en la combustión eran demasiado lentas para observarlas a temperaturas normales; sin embargo, cuando se alcanzaba en algún punto la temperatura de ignición, la velocidad a la que la subsiguiente reacción química liberaba calor era, a su vez, lo bastante alta para elevar la temperatura en la región adyacente hasta la temperatura de ignición. Esta interpretación, que resume toda la química en un simple proceso de liberación de calor cuya velocidad depende de la temperatura, plantea la cuestión siguiente: ¿por qué existe esa dependencia de la temperatura? Y cuando el problema se estructura en términos cuantitativos, proporciona modelos que están de acuerdo con la experiencia y sirven a los ingenieros para diseñar aparatos de combustión. Tales modelos explican cómo las velocidades de combustión dependen de la temperatura, pero no por qué. Ello es debido a que no abordan los fenómenos moleculares subyacentes al proceso de combustión.

Antes de proseguir, quizá convenga precisar algunas definiciones. En la ciencia de la combustión, el término fuego se aplica generalmente a cualquier combustión deliberada o accidental en el "mundo real" (es decir, el mundo fuera del laboratorio). En semejante proceso, por ejemplo, un incendio forestal o el fuego de un horno, se suministra el aire, y se eliminan los productos de combustión y el calor, por medio de flujos variables a gran escala. Las llamas son las subunidades del fuego. Estas, a su vez, pueden dividirse en dos clases: llamas premezcladas, en las que el combustible se mezcla con el oxígeno antes de la combustión, y llamas de difusión, en las que el combustible y el oxígeno se encuentran en la zona de combustión.

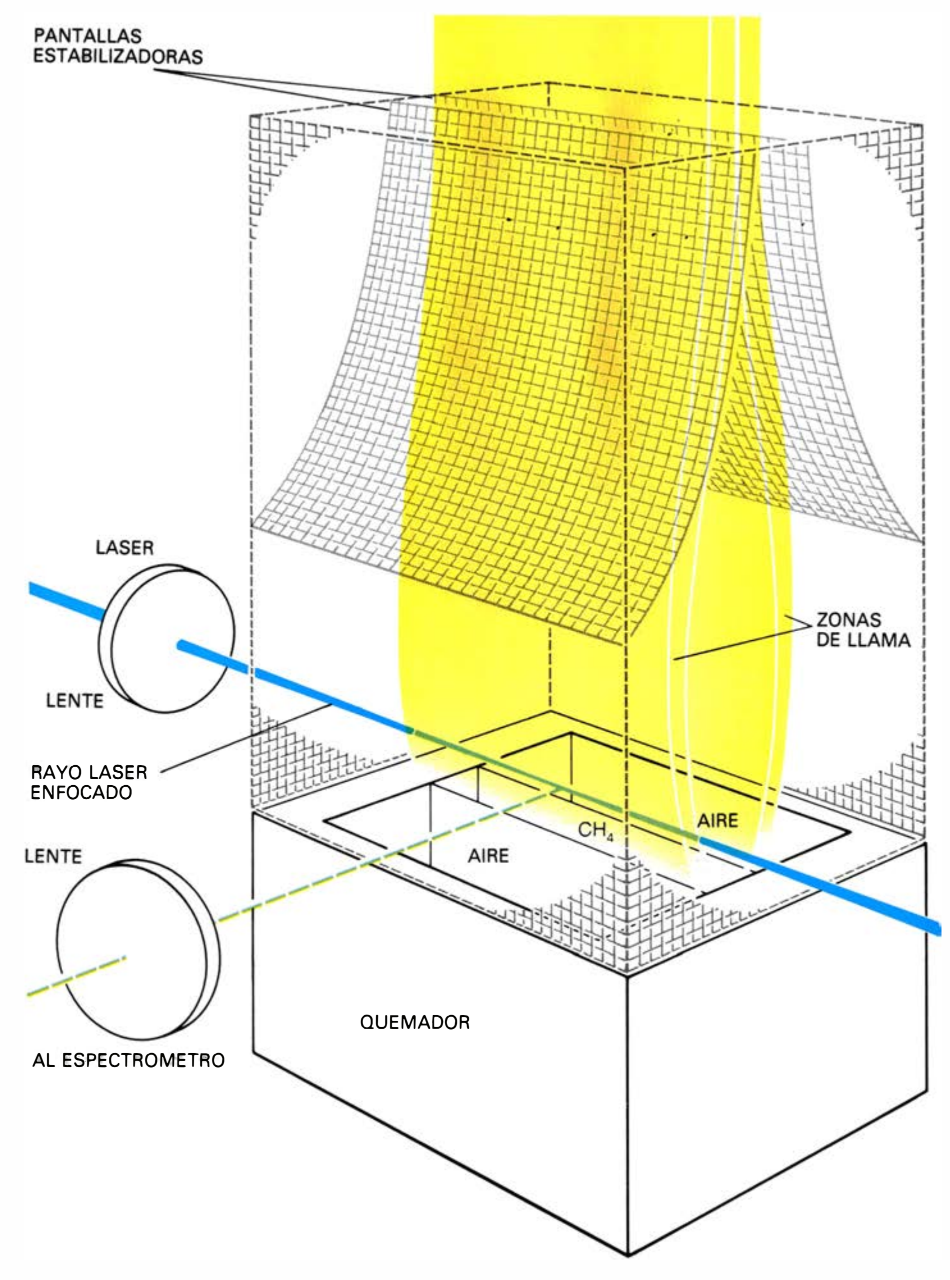
La gasolina y el aire (que contiene alrededor del 20 por ciento de oxígeno) se mezclan en el carburador de un motor convencional de combustión interna y posteriormente se queman (después de una compresión y encendido por chispa en el cilindro) como una llama premezclada. La cera vaporizada y el aire se reúnen por encima de la mecha de una vela y se queman en forma de llama de difusión. Las llamas premezcladas y las llamas de difusión pueden ser turbulentas o laminares, en razón de las velocidades de flujo de las sustancias implicadas. Un flujo turbulento aumenta la velocidad de combustión, lo



**LLAMA DE DIFUSION LAMINAR**, estabilizada con la ayuda de pantallas en esta demostración de la técnica de sondeo láser, fotografiada por Fritz Goro en el Fire Research Center of the National Bureau of Standards. En una llama de este tipo, el combustible y el oxidante se encuentran en la zona de combustión; aquí, el combustible es metano y el oxidante, aire. En la parte superior de la página siguiente veremos una fotografía de la llama a mayor aumento, donde se aprecia la fluorescencia verde excitada por el rayo láser azul y que proviene de moléculas orgánicas grandes, precursoras de hollín.



**LINEA VERDE Y FINA de moléculas gaseosas fluorescentes excitadas por el paso de un rayo láser azul a través de la zona de reacción de una llama de difusión de aire-metano. Fue captada por Goro en esta fotografía de aproximación de la llama. La pantalla de estabilización delantera se ha retirado; la trasera se aprecia vagamente a través de la llama. El receptáculo de la llama mide unos cuatro centímetros.**




**LA FLUORESCENCIA DE LA LLAMA puede analizarse mediante un espectrómetro, tal como se muestra en este diagrama esquemático del aparato experimental de la fotografía de la página precedente. El combustible, metano, fluye a través de una hendidura situada en la mitad del quemador; su salida está flanqueada por dos cortinas de aire laminares que parten de canales situados a lo largo de los lados del quemador. La combustión tiene lugar en las dos zonas de reacción de la interfase del combustible y el aire El rayo láser se enfoca en el lado de la zona de reacción que corresponde al combustible. Los experimentos de formación de carbonilla del Fire Research Center los han realizado Mallard y Smyth.**

que resulta ventajoso cuando se desea una combustión rápida. El flujo laminar, o uniforme, admite más fácil descripción matemática y suele convenir cuando se ensaya en el laboratorio. En todas las llamas citadas hasta ahora el combustible está en forma de vapor antes de que empiece la combustión. Cuando no ocurre eso, nos hallamos ante un fenómeno físico más complicado: una combustión heterogénea, así la que tiene lugar en la superficie de un trozo de carbón que se quema, o un proceso combinado de vaporización-combustión, así el que se presenta en los motores diesel o en los motores de aviones a reacción.

De todos estos tipos de llama, sólo el laminar de llama premezclada ofrece la posibilidad de llevar a cabo un estudio cuantitativo de los procesos químicos, a pesar de los procesos físicos concurrentes, en particular el movimiento de difusión de calor y materia. Ni siquiera la zona de reacción de una llama de un mechero Bunsen, que podríamos tildar de sencilla, es óptima para el estudio de la química de la combustión; el modelo de flujo alrededor de dicha llama es bidimensional, una dimensión más de las que se pueden tratar con simples ecuaciones de flujo. La propia zona de reacción es muy delgada, dificultándose así el análisis químico dentro de la llama. Para estudios de laboratorio de la estructura de las llamas se puede generar un modelo de flujo monodimensional, reemplazando el tubo de un mechero Bunsen por un receptáculo de la llama largo y plano ajustado con un tapón poroso. La zona de reacción puede extenderse reduciendo la presión de la mezcla combustible-oxidante por debajo de la presión atmosférica.

En llamas premezcladas a baja presión, se puede seguir el curso de las reacciones químicas a través de muestras o pruebas adecuadas de composición y temperatura del gas en la zona de combustión. Pruebas intrusivas, como los tubos de cuarzo para el muestreo de gases y los termopares, aportan una información resuelta espacialmente sobre la composición y temperatura, pero tienen el inconveniente de que alteran el flujo, a menudo en un grado significativo, de un modo difícil de tratar matemáticamente. El muestreo óptico, mediante rayos láser, por ejemplo, presenta la ventaja de que la llama no se altera y la desventaja de que la trayectoria del rayo de luz se desvía debido al gradiente de densidad de la llama. Desde finales de la década de 1950, cuando se desarrolló la tecnología para la generación de llamas estables a baja

| LLAMA | REACCION QUIMICA | TEMPERATURA (GRADOS KELVIN) | ENERGIA LIBERADA (JOULE POR GRAMO) |
|---|---|---|---|
| HIDROGENO-OXIGENO | $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$ | 3,100 | 24,000 |
| METANO-OXIGENO | $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$ | 3,000 | 10,000 |
| METANO-AIRE | $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$ | 2,200 | 2,700 |
| OCTANO-OXIGENO | $2 C_8H_{18} + 25 O_2 \rightarrow 16 CO_2 + 18 H_2O$ | 3,100 | 9,900 |
| ACETILENO-OXIGENO | $2 C_2H_2 + 5 O_2 \rightarrow 4 CO_2 + 2 H_2O$ | 3,300 | 11,800 |
| CIANOGENO-OXIGENO | $C_2N_2 + O_2 \rightarrow 2 CO + N_2$ | 4,800 | 6,300 |
| GAS DE AGUA-AIRE | $2 CO + 4 H_2 + 3 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 4 H_2O$ | 2,400 | 4,100 |
| METILHIDRAZINA-TETROXIDO DE NITROGENO | $CH_4N_2 + N_2O_4 \rightarrow 2 H_2O + CO_2 + 2 N_2$ | 3,000 | 7,500 |

**CONDICIONES DE LA LLAMA, que dependen tanto del combustible como del oxidante. Las temperaturas de reacción química representadas en esta tabla se refieren a llamas que queman a presión atmosférica. A presiones superiores, la disociación de los productos de combustión se suprime, conduciendo a temperaturas de llama más altas. El valor de la energía liberada en cada reacción corresponde a la energía liberada por gramo de combustible y oxidante en conjunto (incluyendo los componentes inertes en el caso del aire) después de que los gases producidos se hayan enfriado a temperatura ambiente. Las llamas de hidrógeno y cianógeno son importantes en el laboratorio para estudios espectroscópicos a alta temperatura. El "gas de agua" es una mezcla combustible preparada a partir de carbón y agua. La metilhidrazina se quema con tetróxido de nitrógeno como oxidante en los motores de control de altitud de la lanzadera espacial; contrariamente a la mayoría de combinaciones combustible-oxidante, estas dos sustancias arden al entrar en contacto.**

presión, se han estudiado diversos tipos de llama aplicando varios métodos distintos. Labor investigadora que ha proporcionado una descripción química de los cambios que tienen lugar en las llamas.

La variación en concentración de los componentes moleculares, en función de la distancia al quemador, puede representarse como una serie de gráficos, conocidos como perfiles de llama. El análisis matemático de estos perfiles, realizado por vez primera por Joseph O. Hirschfelder y Charles F. Curtis, de la Universidad de Wisconsin en Madison, durante la década de los 50, permite separar los cambios de la concentración molecular en dos clases: cambios producidos por la difusión y cambios producidos por las reacciones químicas. Así, pueden deducirse las velocidades de reacción netas para todas las sustancias de la llama; la serie de perfiles de velocidades de reacción resultante sirve para la descripción química básica de la llama. Antes de desarrollar las técnicas de obtención de perfiles de reacción, los químicos sabían ya que ninguna serie de perfiles de llama, por completa que fuera, bastaría para identificar los sucesos moleculares responsables de los perfiles, pues la diversidad de sucesos moleculares es mucho mayor que el número de perfiles de llama que se pueden llegar a compilar.

Las moléculas de la mayoría de combustibles tienen demasiados átomos susceptibles de combustión para que se quemen todos simultáneamente. Imagínese el enredo que se produciría si ocho átomos de carbono y 18 de hidrógeno de una molécula de octano ($C_8H_{18}$) se desenlazaran y se combinaran todos a la vez con las moléculas de oxígeno diatómico ($O_2$) circundantes, formando los nuevos enlaces químicos del dióxido de carbono ($CO_2$) y agua ($H_2O$). Ningún combustible arde así. Antes bien, la ruptura de las moléculas de combustible y la formación de productos de combustión proceden a través de largas secuencias de pasos; cada uno de los cuales implica sólo un pequeño reagrupamiento de los enlaces químicos.

Un paso de este tipo se denomina reacción elemental; las diversas moléculas creadas a lo largo de la secuencia se llaman intermedios de reacción y la serie de todas las reacciones elementales, que en conjunto explican la transformación química neta, es el mecanismo de reacción. La ecuación que describe la reacción química completa que acontece en una llama no proporciona ninguna indicación sobre el tipo de cambios individuales que se producen; sin embargo, las ecuaciones que describen las reacciones elementales representan sucesos químicos reales a nivel molecular. Sólo conociendo todas estas importantes reacciones elementales podremos describir con precisión el camino que va desde el combustible hasta los productos de combustión en términos de reagrupamiento de los átomos en moléculas.

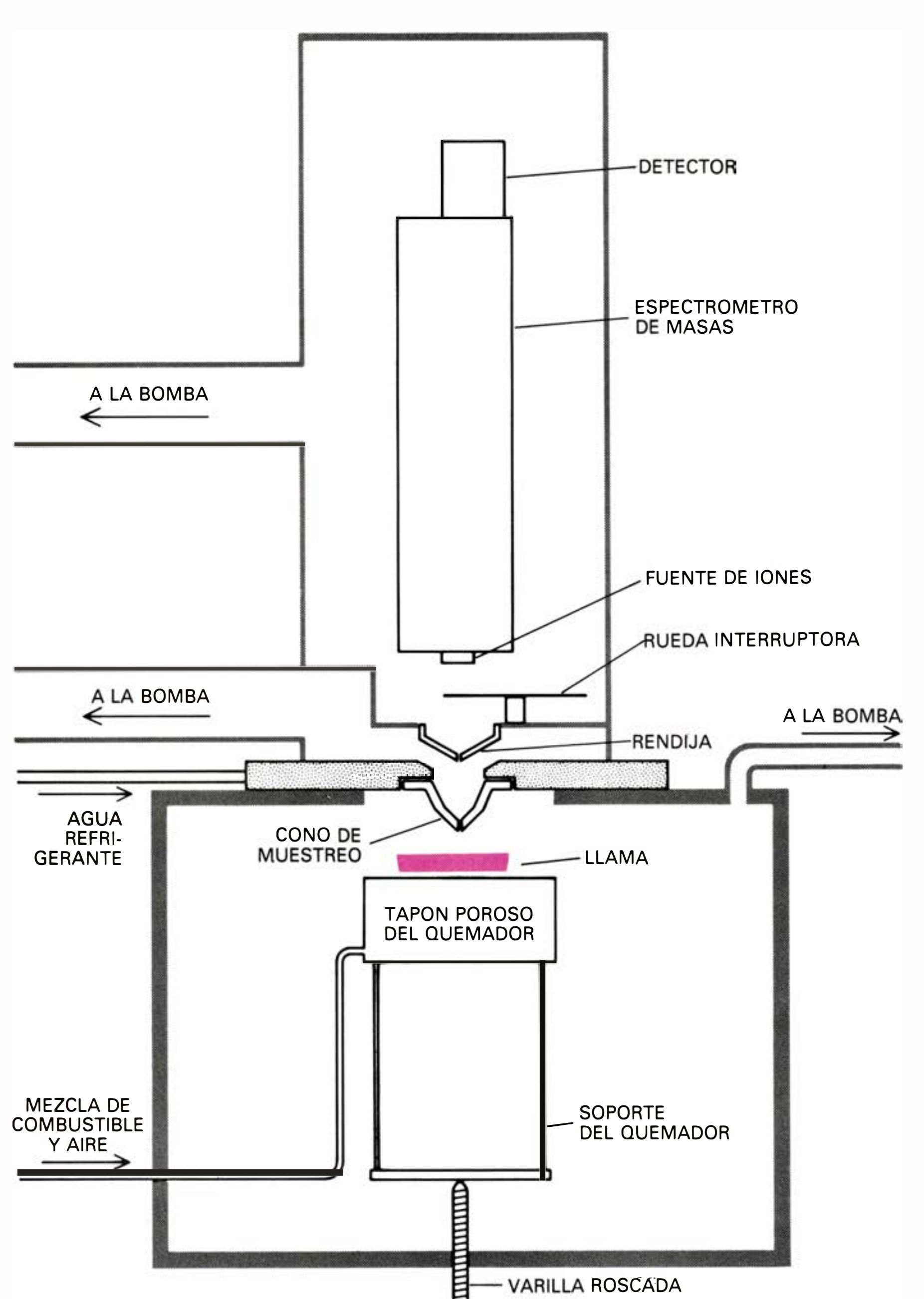
El descubrimiento de las reacciones elementales constituye la clave que nos conducirá al conocimiento del proceso de la combustión. Sin embargo, para obtener esta llave no basta identificar reacciones elementales particulares como sucesos químicos posibles. También debe conocerse cuál es la probabilidad de que las moléculas implicadas reaccionen efectivamente cuando sus trayectorias se cruzan, ya que la mayoría de sus encuentros no terminan en una reacción química. Esta propiedad depende de la velocidad relativa con la que las moléculas chocan. Usualmente, cuanto más violento es el choque, tanto más probable es la reacción química. Ya que tanto la frecuencia como la velocidad de los encuentros moleculares dependen de la temperatura del gas, la probabilidad de reacción aumentará, a menudo bruscamente, con la subida de la temperatura.

El estudio de las probabilidades de reacción y su dependencia de la temperatura pertenece al área de la cinética química, campo donde se acostumbra a expresar dichas probabilidades en términos de constantes de proporcionalidad que dependen de la temperatura, llamadas constantes cinéticas. La velocidad de reacción resulta de multiplicar la constante cinética por la concentración de cada una de las moléculas reaccionantes. Los valores de estas constantes cinéticas, que dependen de la temperatura, no se han medido en los rangos de temperatura de las llamas; por cuya razón suelen requerirse extrapolaciones. Afortunadamente, la teoría de las constantes cinéticas ha recibido amplia comprobación y nos faculta para acometer extrapolaciones precisas (sin grandes reservas).

Los objetivos de la química de la combustión consisten, pues, en identificar las reacciones elementales de una llama, las constantes cinéticas de cada reacción en función de la temperatura y enlazar esta información en modelos de llama que proporcionen predicciones comprobables. Para llegar a semejantes predicciones se utilizan programas de

ordenador en los que se combinan las ecuaciones que describen la difusión, las velocidades de reacción de los cambios de concentración de todas las moléculas de la llama y las ecuaciones que describen el flujo de los gases de reacción.

Durante la búsqueda de reacciones elementales en las llamas, los químicos dedicados al campo de la combustión sabían de antemano qué tipos de reacción tendrían que identificar. A principios de este siglo se aceptaba que las sustancias intermedias que participaban en la mayoría de reacciones químicas se presentaban en cantidades tan mínimas que a durísimas penas se detectaban alguna vez. Ello se pone de manifiesto en particular cuando los intermedios son muy reactivos, en comparación con las demás moléculas presentes, y cuando participan en otras reacciones que producen otros intermedios de reacción. Ejemplo de capital importancia en química de las llamas es el de la reacción elemental que convierte el monóxido de carbono en dióxido de carbono: $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$. El intermedio de reacción implicado en la reacción elemental, el radical hidroxilo (OH), da lugar a otro intermedio de reacción, el hidrógeno atómico (H):




**MUESTREADOR DE SONDEO utilizado para seguir el progreso de las reacciones de combustión en llamas que queman a baja presión. La rápida expansión del gas que entra en el sondeador en forma de cono tiene un efecto refrigerador que "congela" las reacciones de llama. De esta forma, el gas de muestra tomado a través del sondeador puede analizarse fuera de la zona de reacción por los métodos analíticos convencionales, tales como el espectrómetro de masas utilizado en este aparato, diseñado por Joan C. Biordi, Charles P. Lazzara y John Papp. Para obtener perfiles de llama de sustancias cuya elevada reactividad les impediría sobrevivir a semejante proceso de sondeo deben emplearse métodos ópticos.**

no se produce, pues, ningún cambio en el número de intermedios. (Con el término radical los químicos designan fragmentos reactivos de las moléculas.)

Posteriormente, el hidrógeno atómico participa en otras reacciones elementales, algunas de las cuales pueden, a su vez, dar lugar a radicales hidroxilo, permitiendo que se repita la reacción con el monóxido de carbono. Dada la recurrencia de los mismos sucesos moleculares, este tipo de mecanismo de reacción se llama reacción en cadena; las reacciones elementales se denominan pasos propagadores de la cadena y, los átomos y radicales que participan en la propagación de la misma, centros de cadena. Un pequeño número de centros de cadena puede originar grandes cantidades de reacción química.

Los pasos propagadores de cadena son insuficientes para explicar por sí mismos el funcionamiento de las llamas. En los años 30 se reconoció que también eran necesarios pasos iniciadores, pasos finalizadores y pasos ramificadores. En 1956, el premio Nobel de química se concedió conjuntamente a Cyril N. Hinshelwood, de la Universidad de Oxford, y Nikolai N. Semenov, del Instituto de Química Física de Moscú, por su importante contribución a la demostración de que las características principales de las reacciones de oxidación podían explicarse en términos de mecanismos de reacción ramificadores de cadena. (En la época de sus investigaciones químicas, sólo se tenían ideas provisionales acerca de qué reacciones elementales podían producirse, y casi ninguna información respecto a los valores de constantes cinéticas.)

Por paso iniciador de cadena se entiende la reacción elemental en la que una o dos moléculas, normalmente estables, reaccionan para formar uno o dos centros de cadena. Valga de ejemplo la reacción $C_3H_8 \rightarrow C_2H_5 + CH_3$, en la que la molécula estable de propano ($C_3H_8$) se descompone espontáneamente cuando se eleva a un nivel energético alto por choque con otras moléculas de un gas caliente y forma los dos radicales $C_2H_5$ y $CH_3$, cada uno de los cuales puede, a su vez, servir de centro de cadena.

Paso finalizador de cadena es la reacción elemental que produce el efecto opuesto. Por ejemplo, en la reacción $H + OH + N_2 \rightarrow H_2O + N_2$, dos centros de cadena, un átomo de hidrógeno y un radical hidroxilo, topan simultáneamente con la molécula estable de nitrógeno ($N_2$) y forman otra molécula estable: agua. Aquí, el nitrógeno molecular actúa a modo de caperuza, absor-

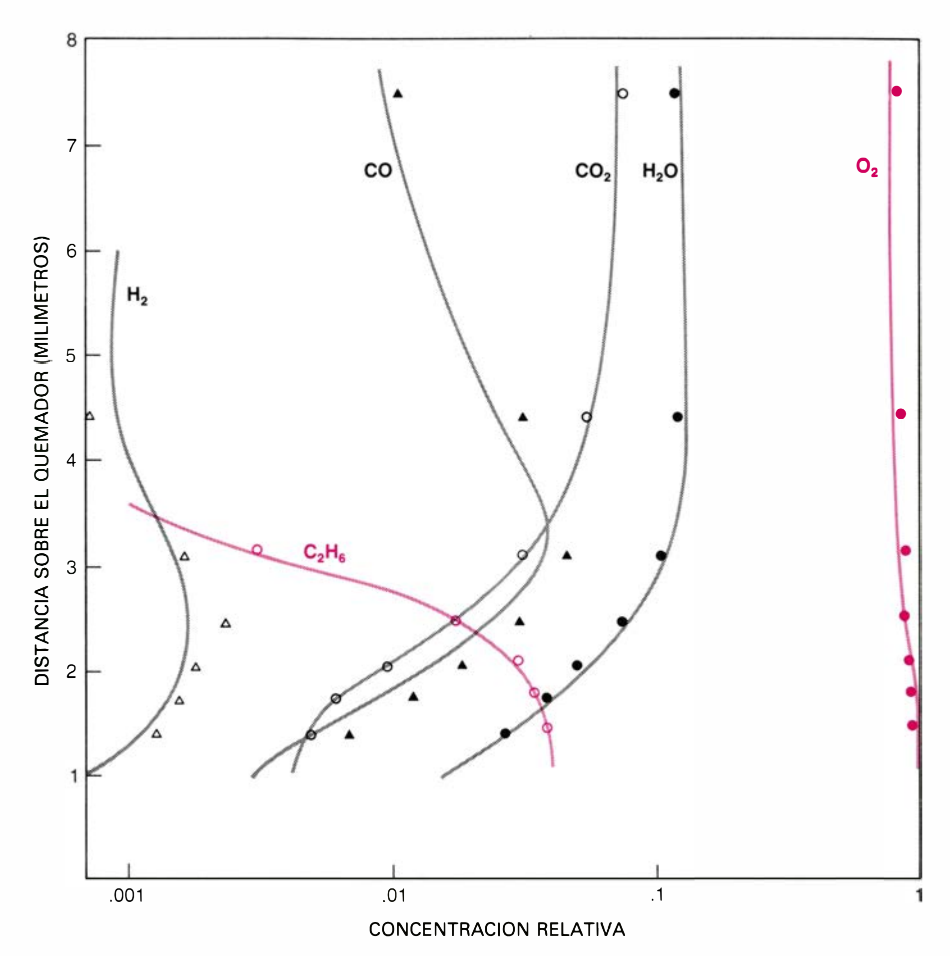
biendo parte de la energía que se libera cuando se forma el nuevo enlace de la molécula de agua.

Sin embargo, la característica distintiva de las llamas es la participación de pasos ramificadores de cadena: reacciones elementales en las que el número de centros de cadena aumenta de uno a dos, o quizá hasta tres. La reacción más importante de ramificación de cadena es $H + O_2 \rightarrow O + OH$, en la que el hidrógeno atómico reacciona con oxígeno molécular para proporcionar oxígeno atómico y un radical hidroxilo.

Esta teoría fundamental se conoce desde hace medio siglo. Sin embargo, para desarrollarla en una descripción más detallada de la química de las llamas se necesitan dos factores adicionales. Consiste el primero en una serie de procedimientos matemáticos prácticos que ayuden a calcular los efectos combinados de todas las reacciones elementales sobre las propiedades químicas y físicas observables. Expresar los procesos físicos de difusión, transmisión de calor, reacción química y flujo de forma matemática es sólo el principio; las ecuaciones diferenciales simultáneas resultantes presentan dos dificultades, una obvia y sutil la otra.

La dificultad obvia consiste en que una exacta descripción de la difusión y de la transmisión de calor requiere disponer de los valores de ciertos parámetros (llamados coeficientes multicomponentes de transporte), que no se pueden medir en el laboratorio. Podemos hacer descripciones aproximadas de los mismos confiando únicamente en suposiciones de cuestionable exactitud. Afortunadamente, investigaciones recientes con modelos automatizados han mostrado que las aproximaciones realizadas en la descripción de la difusión y la transmisión de calor no distorsionan apreciablemente los resultados.

La dificultad sutil consiste en que las ecuaciones diferenciales ostentan una propiedad, la rigidez, que implica que algunas variables de concentración se mantengan en valores casi constantes para reacciones muy rápidas, mientras que otras cambian. El control de este factor requiere cálculos implacablemente prolijos si la serie de ecuaciones diferenciales simultáneas se resuelve numéricamente, por métodos ordinarios, con un ordenador digital. En la década de 1970 se desarrollaron técnicas especiales de cálculo para tratar estas ecuaciones diferenciales rígidas, la mayoría de ellas basadas en la investigación inicial de Charles W. Gear, de la Universidad de Illinois en Urbana. La aparición de técnicas numéricas de rigidez estable posibilitó la descripción de llamas unidimensionales, teniendo en cuenta la química de las llamas, con ordenadores digitales de gran capacidad.




**PERFILES DE LLAMA TEORICOS (*curvas*), comparados con las mediciones de laboratorio (*datos puntuales*) para llamas laminares de baja presión. Los perfiles mostrados aquí fueron calculados por Jürgen Warnatz, de la Universidad Politécnica de Darmstadt, para un mecanismo de reacción con 58 reacciones elementales, teniendo en cuenta la difusión de las 20 sustancias implicadas en la reacción global. Los datos experimentales, tomados de una llama de etano-oxígeno que ardía a una presión diez veces menor que la atmosférica, fueron obtenidos por Robert M. Fristrom, William H. Avery y C. Grunfelder, de la Universidad Johns Hopkins. Análisis láser de llamas similares, realizados por James H. Bechtel y colaboradores en el General Motors Research Laboratory, han confirmado los perfiles de espectrometría de masas.**

Los cálculos de simulación son buenos en la medida que lo sean los datos de entrada, en nuestro caso las constantes cinéticas de todas las reacciones elementales. Pero la excesiva complejidad intrínseca de las llamas impide definir estos coeficientes; habrá que hallarlos, pues, en medios más sencillos. Así, el segundo requerimiento consiste en medir las constantes cinéticas de las reacciones elementales experimentalmente. ¿Cómo?

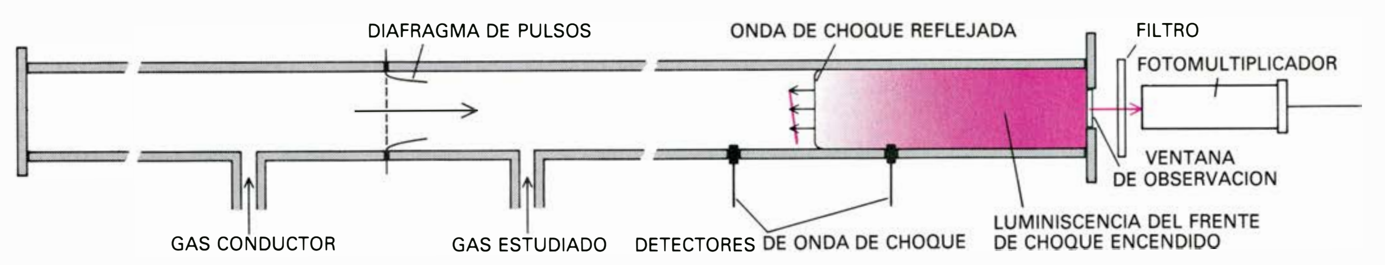
A pesar de la dependencia mundial de las combustiones en fase gaseosa para obtener energía, se cataloga a los científicos que estudian las reacciones de los gases (especialistas en cinética de gases) entre quienes practican una "ciencia menor": grupos pequeños (a menudo unipersonales), que trabajan en angostos laboratorios y con escaso presupuesto, dispersos por el globo, que las más de las veces confrontan sus opiniones al margen de las reuniones científicas cuyo propósito principal requiere algún aporte de cinética de gases fundamental. Cuando se desarrolló por primera vez la teoría de las reacciones de la llama, los especialistas en cinética de gases estudiaban reacciones de oxidación en ampollas de vidrio, donde las reacciones se podían hacer transcurrir lentamente, manteniendo temperaturas y presiones más bajas que las que normalmente prevalecen en las llamas. Tras largos años de industrioso trabajo se llegaron a identificar por este procedimiento un gran número de reacciones elementales y deducir las constantes cinéticas de las mismas. Sin embargo, todo este esfuerzo eludía virtualmente las reacciones de cadena centrales, demasiado rápidas para abordarlas con estos métodos.

El desarrollo de técnicas refinadas de laboratorio ha permitido incluso el estudio de las reacciones elementales más rápidas. Pero ninguna técnica experimental ni ningún laboratorio aislado

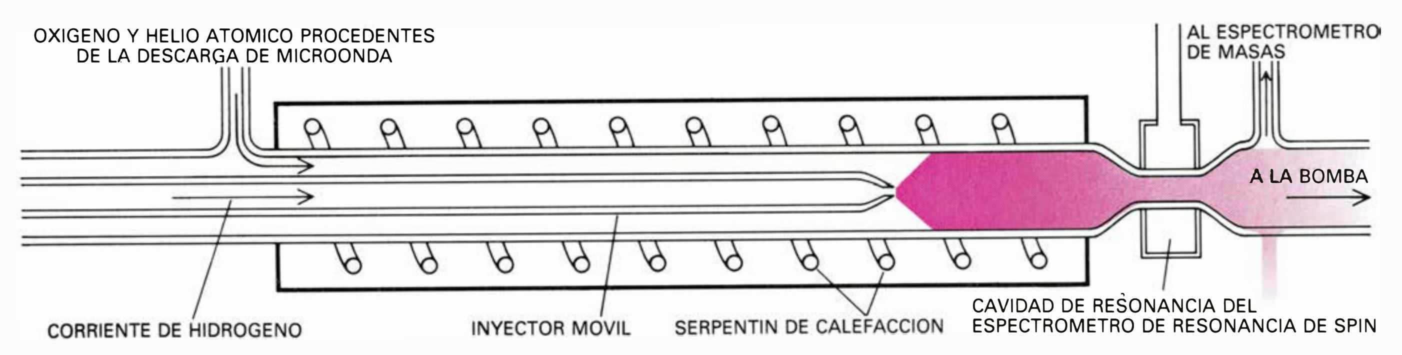
han dominado este campo; en el nuevo conocimiento de las reacciones de combustión elementales han intervenido varios investigadores, trabajando con diferentes técnicas. Para descubrir el tono de este tipo de investigación me detendré en tres experimentos basados en otras tantas técnicas, responsables de los mayores adelantos. La serie de tres reacciones elementales estudiada en estos experimentos constituye la principal reacción de cadena de las llamas de hidrógeno-oxígeno.

Una onda de choque que atraviesa un gas lo calienta rápidamente. La temperatura puede subir miles de grados Kelvin en una milmillonésima de segundo. En un tubo de choque, un aparato de laboratorio en el que ondas de choque de fuerza controlada pasan a través de un gas de prueba, se pueden observar, por métodos analíticos rápidos, las reacciones químicas que resultan del calentamiento por choque. En 1966, David Gutman y Garry L. Schott, de Los Alamos Scientific Laboratory, emplearon un tubo de choque para generar mezclas de hidrógeno y oxígeno, calentadas por este método, que estaban altamente diluidas en argon, un gas químicamente inerte, al objeto de mantener constante la temperatura durante la reacción. El crecimiento de centros de cadena se pudo seguir mediante espectroscopía de fluorescencia en una escala de tiempos del orden del microsegundo.

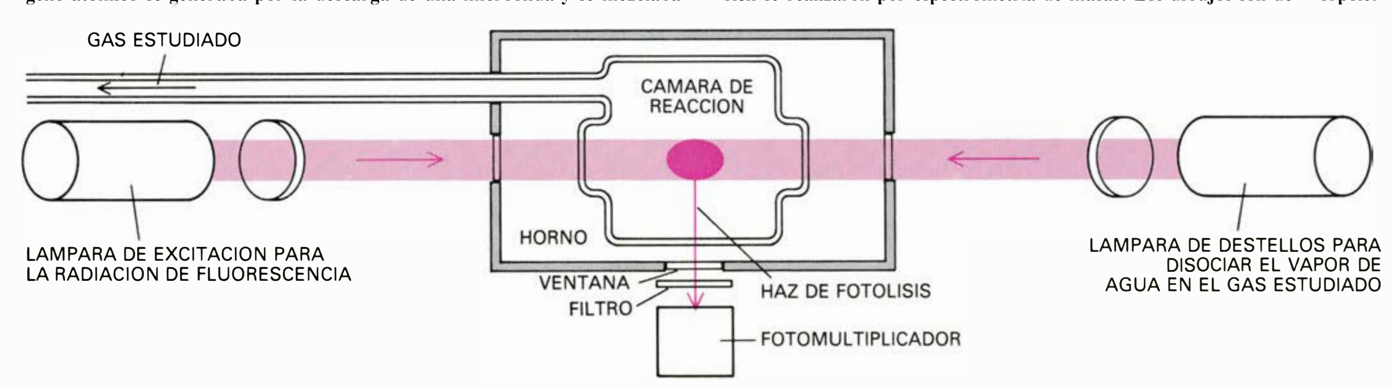
Gutman y Schott obtenían una muestra analítica añadiendo al gas de prueba un poco de monóxido de carbono, que emite luminiscencia azul con una intensidad proporcional a la concentración de átomos de oxígeno. La velocidad a la que la intensidad de la luminiscencia crecía se extrapolaba a una relación $O_2$-a-$H_2$ igual a cero, en la que la velocidad de ramificación de cadena estaría gobernada solamente por la velocidad




**EXPERIMENTOS EN TUBO DE CHOQUE. Se llevan a cabo calentando un gas con una onda de choque que atraviesa un tubo largo y observando luego la reacción subsiguiente en el gas caliente. El aparato mostrado lo utilizaron David Gutman y Garry L. Schott en Los Alamos Scientific Laboratory, en 1966, para determinar la constante cinética de la reacción $H + O_2 \rightarrow OH + O$. El gas era una mezcla de moléculas diatómicas –hidrógeno ($H_2$), oxígeno ($O_2$) y monóxido de carbono– altamente diluida en el gas inerte argon. La onda de choque se generaba al reventar un fino diafragma de metal que separaba el gas conductor mantenido a alta presión (en este caso $H_2$) del gas estudiado, que se halla a baja presión. La reacción química empezaba cuando la onda de choque se reflejaba en la pared terminal del tubo, calentando el gas objeto de estudio en una milmillonésima de segundo hasta la temperatura de reacción. La intensidad de la luminiscencia de la reacción $CO + O$, que resulta proporcional a la concentración de átomos de oxígeno del gas estudiado, se registraba por un tubo fotomultiplicador a través de una ventana de la pared terminal del tubo de choque. La velocidad de la reacción química, medida en una escala de microsegundos, podía, por tanto, deducirse a partir de la velocidad de incremento de la intensidad de la luminiscencia.**




**EXPERIMENTOS DE DESCARGA DE FLUJO. Permiten estudiar reacciones rápidas haciendo pasar el gas de reacción a alta velocidad delante de un punto fijo de observación. En esta experiencia, realizada en 1968 por Arthur A. Westenberg y Newman de Haas, de la Universidad Johns Hopkins, el oxígeno atómico se generaba por la descarga de una microonda y se mezclaba con hidrógeno molecular que fluía a través de un tubo calentado. Se determinó la constante cinética de la reacción $O + H_2 \rightarrow OH + H$ midiendo las concentraciones de reactivos y productos con la ayuda de un espectrómetro de resonancia de spin situado más allá del punto de mezcla. Las mediciones también se realizaron por espectrometría de masas. Los dibujos son de Worpole.**



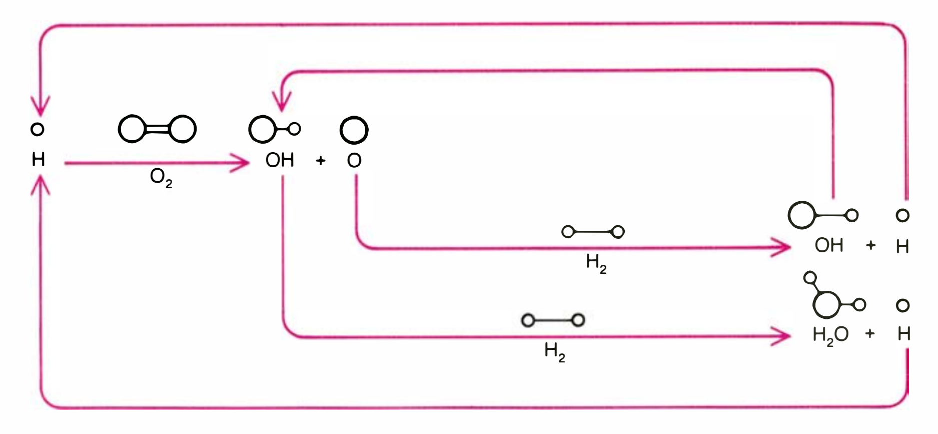

**EXPERIMENTOS DE FOTOLISIS por fogonazo. Se realizaban iniciando la reacción mediante un intenso fogonazo de radiación ultravioleta. El aparato representado aquí lo utilizaron, en 1980, Frank P. Tully y Akkihebbal R. Ravishankara, del Instituto de Tecnología de Georgia, en el transcurso de un estudio de la reacción $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$. Los radicales hidroxilo (OH) se obtenían mediante la fotodisociación de trazas de vapor de agua en el interior de la cámara de reacción con una lámpara secundaria (*derecha*). La velocidad de reacción se determinó mediante la observación de la intensidad de fluorescencia de una pequeña fracción de radicales hidroxilo, excitados hasta un estado de energía radiante por la lámpara primaria (*izquierda*).**

de reacción $H + O_2 \rightarrow OH + O$. Lograron así determinar en el rango de temperaturas de 1100 a 1700 grados Kelvin las constantes cinéticas de las reacciones elementales responsables de la ramificación de cadena en llamas de hidrógeno-oxígeno.

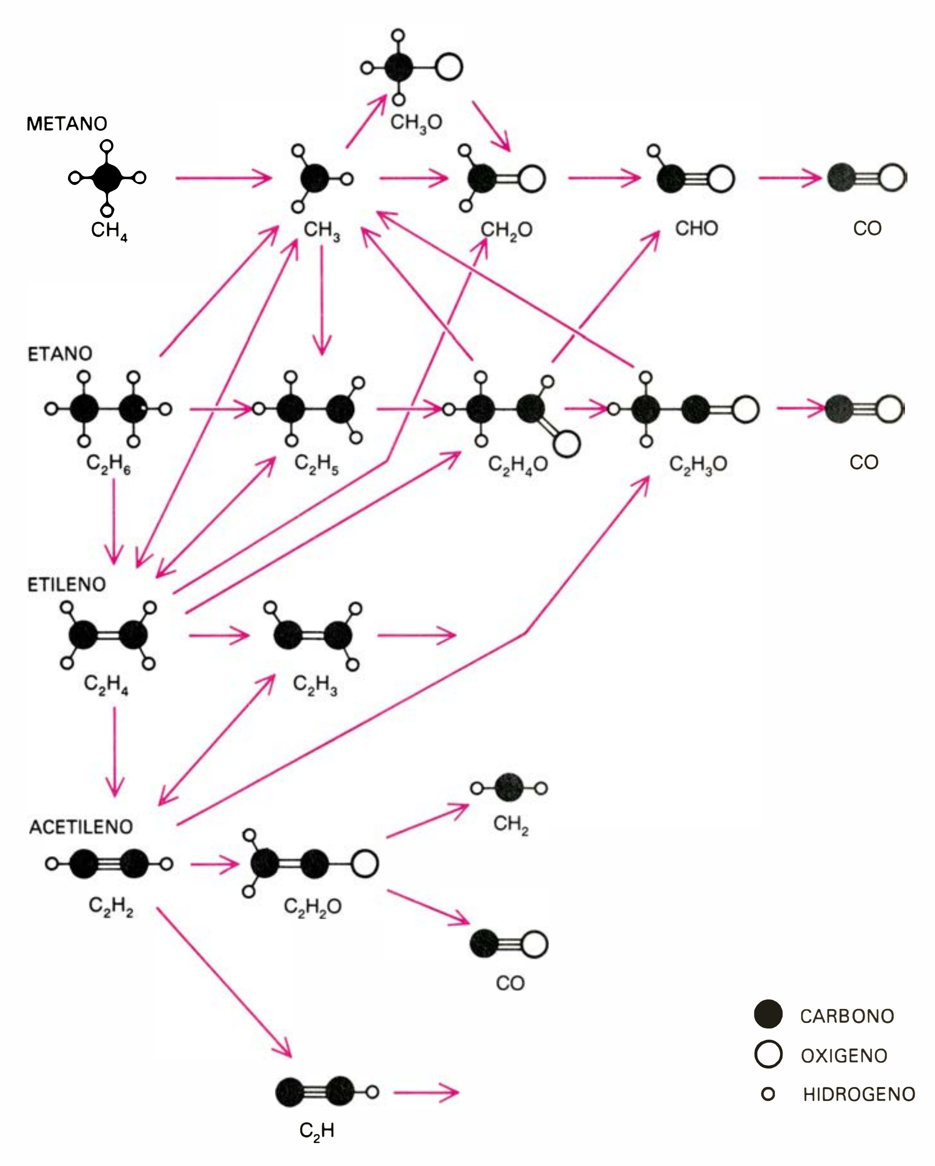
Los átomos reactivos pueden obtenerse a bajas temperaturas, descomponiendo moléculas mediante descargas eléctricas. Para estudiar reacciones rápidas de átomos así producidos, se mezclan con otros gases y se envía la mezcla rápidamente hacia un punto de observación situado más lejos. En 1968, Arthur A. Westenberg y Newman de Haas, del laboratorio de física aplicada de la Universidad Johns Hopkins, obtuvieron una pequeña cantidad de oxígeno atómico con una descarga de una microonda en oxígeno molecular diluido con el gas inerte helio. Se añadió la mezcla de oxígeno atómico y helio a una corriente de hidrógeno que fluía hacia un tubo mantenido a la temperatura de reacción deseada. Aguas abajo del punto de mezcla se midió la pérdida de átomos de oxígeno, debida a la reacción con moléculas de hidrógeno, con un espectrómetro de resonancia de spin. Se pudo así determinar la constante cinética de la segunda reacción elemental de las llamas de hidrógeno-oxígeno, es decir $O + H_2 \rightarrow OH + H$, en un margen de temperaturas de 500 a 900 grados Kelvin.

Otro sistema para descomponer moléculas estables es la aplicación de radiación ultravioleta. En 1980, Frank P. Tully y Akkihebbal R. Ravishankara, del Instituto de Tecnología de Georgia, desarrollaron un aparato en el que una pequeña cantidad de vapor de agua en hidrógeno podía irradiarse, a una temperatura de reacción deseada, con un rayo intenso de radiación ultravioleta. Los radicales hidroxilo creados por el rayo podían entonces reaccionar con las moléculas de hidrógeno en la tercera reacción elemental de la llama hidrógeno-oxígeno, es decir, $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$. La caída en concentración de OH fue seguida por espectroscopía analítica ultravioleta. El resultado fue una determinación de la constante cinética de esta reacción en un margen de temperaturas de 500 a 1100 grados Kelvin.

Docenas de experimentos como éstos, en su conjunto, han proporcionado a los químicos la serie de constantes cinéticas de las reacciones elementales de la llama oxígeno-hidrógeno; y han permitido describir estas llamas con un ordenador. Además de las tres reacciones elementales examinadas antes, pode-




**REACCIONES ELEMENTALES** de una llama de hidrógeno. Intervinieron en ellas las sustancias intermedias H, O y OH. Se descubre en esta serie de reacciones un efecto típico de "cadena de ramificación": por cada átomo de hidrógeno que entra en la secuencia se generan tres. Este fenómeno es el que confiere a las reacciones de combustión una velocidad explosiva. Se ha logrado ya determinar las constantes cinéticas de todas estas reacciones. A bajas temperaturas y altas presiones tienen lugar reacciones que producen y consumen peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$), el radical hidroxiperoxilo ($HO_2$) y ozono ($O_3$).




**LOS HIDROCARBUROS SE QUEMAN** mediante una compleja red de rutas de combustión, en la que intervienen tal cantidad de reacciones elementales que se necesita un diagrama de flujo para abrirse camino en el curso global del mecanismo de reacción. Este diagrama de flujo, relativamente sencillo, muestra las transformaciones más importantes que tienen lugar en la combustión de los pequeños hidrocarburos metano ($CH_4$), etano ($C_2H_6$) y etileno ($C_2H_4$). Se omiten aquí los intermedios O, H, $H_2$ y OH y los productos de combustión $CO_2$ y $H_2O$ por mor de claridad. Tampoco se recogen en la ilustración las reacciones adicionales del acetileno ($C_2H_2$) y las reacciones de los intermedios hidrocarbonados $C_2H$, $C_2H_3$ y $CH_2$, alguno de los cuales conduce a la formación de hidrocarburos más largos y de carbonilla.

mos contar con otras 20, la mayoría de las cuales se refieren a la función de los intermedios secundarios peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$), el radical hidroxiperoxilo ($HO_2$) y ozono ($O_3$), a la hora de construir modelos que describan hasta los menores detalles de la reacción hidrógeno-oxígeno.

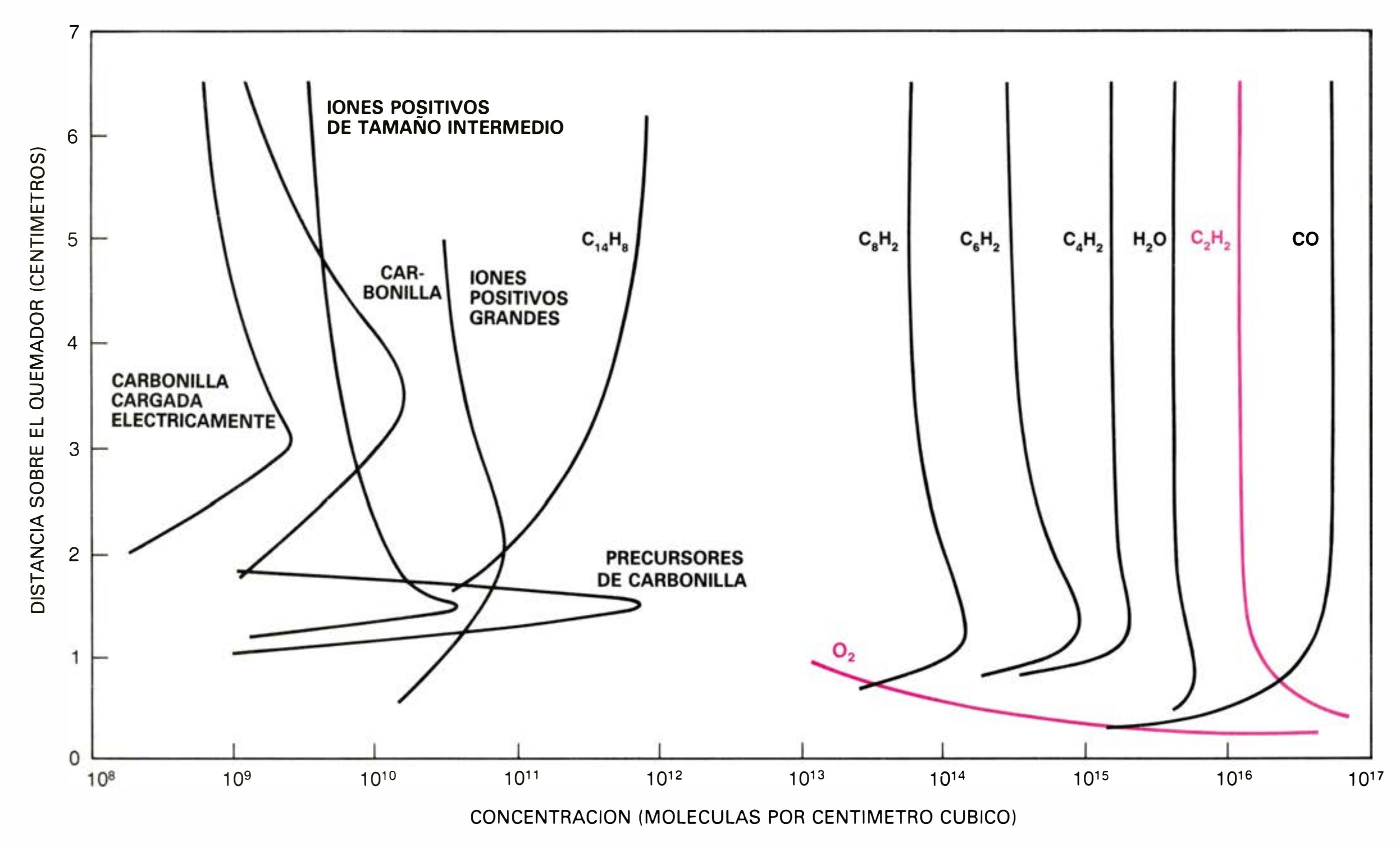
Las llamas de hidrógeno-oxígeno hallan su interés científico entendidas como procesos de combustión prototípicas, pero su única aplicación fuera del laboratorio se reduce a motores de cohetes. Las llamas de uso práctico queman hidrocarburos. ¿Qué se sabe de ellas?

Podríamos asimilar la descripción química de una llama hidrocarbonada a un libro constituido por una introducción casi completa (las reacciones de las moléculas de combustible), un último capítulo completo (la oxidación de $H_2$ y CO) y un poco de todo fragmentario en medio. El número de capítulos del libro crecería con el número de átomos de carbono de las moléculas de combustible, salvo para los combustibles más simples, los dotados de uno o dos átomos de carbono, que comparten caminos de reacción comunes y por tanto tienen el mismo mecanismo de combustión. Los títulos de los capítulos derivarían de los combustibles y de los intermedios conocidos: $CH_4$, $CH_3$, $CH_2$, CH, $C_2H_6$, $C_2H_5$, $C_2H_4$, $C_2H_3$, $C_2H_2$, $C_2H$, $CH_3O$, $CH_2O$, CHO, $C_2H_4O$, $C_2H_3O$, $C_2H_2O$...

Los modelos de ensayo de las llamas de hidrocarburos se obtienen combinando las reacciones elementales que el investigador considera importantes, utilizando tanto las constantes cinéticas medidas como las estimadas. A continuación, se prueban ante múltiples y diversos fenómenos experimentales: velocidades de propagación de llama, mediciones de ignición en un tubo de choque, perfiles de concentración molecular en un reactor de flujo, etcétera. Sin embargo, hasta para los hidrocarburos más pequeños, la lista de reacciones elementales consideradas por una razón u otra alcanza pronto el centenar, y el único sistema para abrirse camino en el proceso es ayudarse de los diagramas de flujo.

Aunque se dominan ya muchas características generales, siguen debatiéndose los pormenores de las llamas hidrocarbonadas. En primer lugar, la mayoría de las reacciones elementales son de tipos bien conocidos en cinética química. Reacciones de transferencia atómica, así $OH + C_2H_6 \rightarrow H_2O + C_2H_5$, constituyen el principal ataque a los combustibles hidrocarbonados. Pero las moléculas de combustible de mayor tamaño no suelen alcanzar intactas la zona de reacción, porque el calor las descompone a un ritmo que supera el de su propia difusión. El tipo de descomposición más común implica la pérdida de dos átomos de carbono a la vez, de modo análogo a la descomposición del octano mediante la reacción $C_8H_{18} \rightarrow C_2H_5 + C_6H_{13}$. La mayoría de intermediarios con un número impar de átomos de hidrógeno, así el radical $C_2H_5$, pierde rápidamente uno de ellos para formar intermedios del tipo de hidrocarburos denominados olefinas, en este caso etileno ($C_2H_4$). Otros pueden perder átomos de hidrógeno para constituir intermedios del tipo denominado acetilénico; un producto típico de este tipo es el acetileno ($C_2H_2$).

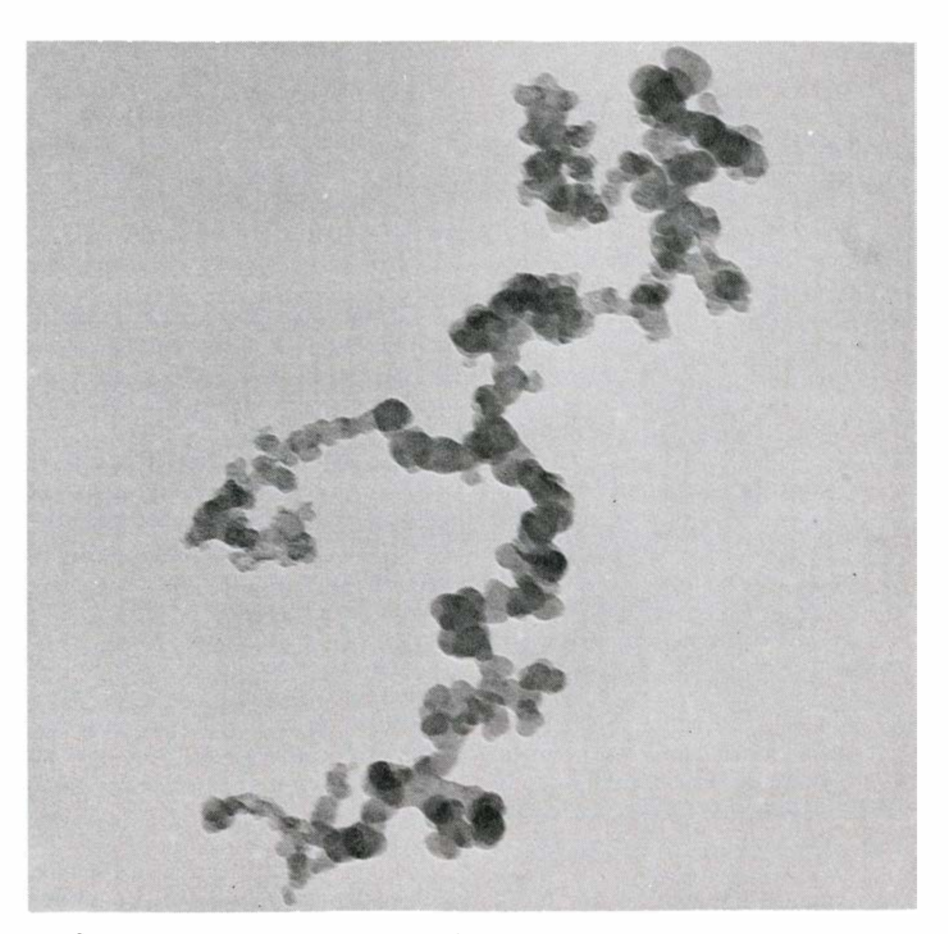
Se sabe que las olefinas y etilenos experimentan algunos tipos de reacciones elementales en llamas, desconocidos en la cinética química tradicional. Así, Jürgen Warnatz, de la Universidad Politécnica de Darmstadt, acaba de llegar a la conclusión, a partir de la estimación de la velocidad de las llamas de acetileno, que los radicales $CH_2$ formados cuando átomos de oxígeno reac-




**COMPOSICION MOLECULAR de una típica llama de laboratorio productora de carbonilla, que varía en función de la distancia por encima del quemador. Esta serie de perfiles de concentración logarítmicos, obtenidos para una llama de acetileno-oxígeno, combina los resultados de las mediciones realizadas por Ulrich Bonne, Klaus H. Homann y Heinz-Georg Wagner, de la Universidad de Göttingen, Douglas B. Olson y Hartwell F. Calcote, de los Aerochem Research Laboratories, y Jack B. Howard y colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. El grupo de intermedios etiquetado como "precursores de carbonilla" consiste en varios hidrocarburos de entre 20 y 50 átomos de carbono. A diferencia de las moléculas de hidrocarburos poliaromáticos, o de anillo múltiple (así el $C_{14}H_8$), cuyo perfil en la llama sube continuamente, los precursores de carbonilla desaparecen cuando ésta se produce.**

cionan con acetileno mediante la reacción $O + C_2H_2 \rightarrow CH_2 + CO$, se fragmentan al reaccionar con oxígeno molecular en la reacción $CH_2 + O_2 \rightarrow CO_2 + H + H$. Raramente ocurre una trasformación tan compleja de los enlaces químicos en reacciones elementales singulares, si exceptuamos el dominio de las llamas.

Los modelos automatizados de la combustión del metano ($CH_4$) incluyen ya más de 100 reacciones elementales. ¿Hay, pues, alguna esperanza de que se diseñe uno para el octano ($C_8H_{18}$), incluso dando por supuesta la disponibilidad de ordenadores de gran poder de cálculo? La respuesta es que no cabe tal, si el modelo debe tener específicamente en cuenta todos los intermedios: el número de reacciones requeridas crece geométricamente con el tamaño de la molécula de combustible y adquiere un valor muy alto antes de llegar al octano. Sin embargo, si el modelo de combustión de octano sólo ha de considerar cuantitativamente los sucesos químicos centrales a nivel molecular, los ordenadores actuales podrían realizar el trabajo agrupando los intermedios en razón de su estructura y, las reacciones, de acuerdo con su tipo. La posibilidad de establecer las constantes cinéticas de semejante modelo queda pendiente para la próxima generación de químicos de la combustión.



**LA ESTRUCTURA EXTENDIDA DE LA CARBONILLA resulta evidente en esta micrografía electrónica de transmisión realizada por Robin Stevenson, de los General Motors Research Laboratories. Las partículas de carbonilla de este tipo se forman, en una llama hidrocarbonada rica en combustible, por aglomeración de un aerosol de pequeñas esferas de carbón que contienen cantidades variables de hidrógeno e hidrocarburos atrapados. En las llamas que producen un brillo amarillo, pero no humo negro, el aerosol de carbonilla se oxida por los gases de la llama más deprisa que se aglomera. Esta partícula se recogió en un sustrato de carbón amorfo procedente del escape de un motor diesel. La imagen está deliberadamente desenfocada para resaltar el contraste. La ampliación ronda 110.000 diámetros.**

La combustión vierte contaminantes a la atmósfera: óxidos de nitrógeno y azufre, hidrocarburos incompletamente quemados y partículas, carbonilla por ejemplo. Desde la óptica de una ingeniería más o menos pragmática, la supresión de las emisiones de contaminantes se puede conseguir ajustando las condiciones de combustión, seleccionando combustibles bajos en nitrógeno y azufre, tratando previamente los combustibles o tratando luego los gases de combustión. Desde un punto de vista científico, la meta se fija en descubrir qué reacciones elementales crean o eliminan contaminantes.

El aspecto más conocido de la contaminación generada en la combustión es la formación de óxidos de nitrógeno de fórmula genérica $NO_x$ en llamas muy calientes (a temperaturas por encima de los 2000 grados Kelvin). Según parece, el óxido de nitrógeno (NO) es el único de los óxidos de nitrógeno formado directamente en las llamas; el dióxido de nitrógeno ($NO_2$) aparece más tarde, mediante reacciones lentas con oxígeno atmosférico que tienen lugar incluso a temperatura ambiente. En llamas muy calientes, el nitrógeno molecular del aire pierde su carácter inerte y se divide, mediante oxígeno, en la reacción $O + N_2 \rightarrow NO + N$. Los átomos de nitrógeno atacan rápidamente al oxígeno molecular y forman óxido nítrico y oxígeno atómico mediante la reacción $N + O_2 \rightarrow NO + O$, completándose así una cadena de dos reacciones conocida como el mecanismo de Zeldovich (en honor de Yakov B. Zeldovich, del Instituto de Química Física de Moscú, primero que fue en proponerlo en 1947). Las mediciones de la constante cinética de la reacción $O + N_2 \rightarrow NO + N$ en un tubo de choque, publicadas en 1980 por Jamie Monat, Ronald K. Hanson y Charles H. Kruger, Jr., de la Universidad de Stanford, permiten evaluar, de una manera precisa, la producción de óxido nítrico por este camino.

A temperaturas suficientemente bajas para suprimir la reacción de Zeldovich, otras reacciones generan todavía óxido nítrico. Charles Fenimore, del General Electric Research Laboratory, demostró que en los primeros estadios de las llamas se detectan ya trazas de ese producto, fenómeno que le llevó a acuñar el término "NO primario". No está claro qué molécula o radical sea suficientemente energético y abundante para atacar al $N_2$. Una hipótesis sugiere que se trata del radical CH, mediante la secuencia de reacciones: $O + C_2H_2 \rightarrow CH + CHO$, seguida de $CH + N_2 \rightarrow HNC + N$, seguida de $N + O_2 \rightarrow NO + O$. También se cree que el cianuro de hidrógeno (HCN) es un intermedio importante cuando se forma óxido nítrico a partir del nitrógeno ("fuel nitrogen", expresión genérica de múltiples compuestos que contienen nitrógeno, encontrados en pequeñas concentraciones en el petróleo). No se conoce todavía la reacción que conduce a la formación de óxido nítrico a partir del cianuro de hidrógeno. Sin embargo, la mayor parte del óxido nítrico generado primariamente en llamas nunca escapa a la atmósfera, sino que se convierte en nitrógeno molecular. ¿Cómo? Nadie lo sabe. Obviamente existe un amplio espacio para investigaciones adicionales sobre la formación y eliminación de compuestos $NO_x$ en las llamas.

El conocimiento de los fundamentos de las reacciones que implican óxido de nitrógeno ha permitido diseñar un método ingenioso para eliminar de los gases de postcombustión óxido nítrico. El método, desarrollado en una versión comercial por Richard K. Lyon, de la Exxon Research and Engineering Corporation, consiste en la inyección de amoníaco ($NH_3$) en el gas de postllama en un determinado punto del proceso de enfriamiento. Ello conduce rápidamente a la formación de radicales $NH_2$, principalmente por la reacción $NH_3 + OH \rightarrow H_2O + NH_2$. Una de las reacciones elementales del $NH_2$, caracterizada en 1972 por Manfred Gehring, Karlheinz Hoyermann, Helmut Schacke y Jürgen Wolfrum, de la Universidad de Göttingen, es $NH_2 + NO \rightarrow N_2 + H_2O$. Así, los dos átomos de nitrógeno de las moléculas reaccionantes acaban en nitrógeno molecular, eliminándose efectivamente el NO.

Al entrar en una llama, los compuestos de azufre forman rápidamente la molécula estable de dióxido de azufre ($SO_2$), pues el SO, el sulfuro análogo al NO, reacciona directamente con oxígeno a través de la reacción $SO + O_2 \rightarrow SO_2 + O$, incluso a temperatura ambiente. Los químicos que estudian las reacciones que forman el SO y el $SO_2$ se encuentran con el problema siguiente: el azufre en fase gaseosa genera un conjunto desconcertante de compuestos reactivos y estables, todos ellos ácidos y todos ellos indeseables en la atmósfera. De ahí el escaso incentivo práctico que encierra la identificación de las reacciones elementales específicas del azufre en llamas. El control de la contaminación por azufre obliga a eliminar todas las formas del elemento antes de la combustión o a quitar todos los óxidos ácidos de azufre después.

Tenemos, por último, la carbonilla, cuya formación y oxidación constituyen dos de los procesos más intensamente investigados en química de la combustión. Tiempo atrás, el principal uso dado al petróleo consistía en su utilización en lámparas de queroseno, que requerían la formación intermedia de carbonilla para proporcionar luminiscencia, y la oxidación subsiguiente de la carbonilla para evitar el ennegrecimiento del tubo de la lámpara. Hoy en día, la iluminación preferida es la eléctrica, y así la carbonilla de la gran mayoría de llamas se ha convertido en una molestia. Los factores que favorecen la producción de carbonilla son muy conocidos: relaciones combustible-aire elevadas, combustibles que contienen compuestos con relaciones bajas hidrógeno-carbono, ignición azarosa y mezcla deficiente de combustible y aire. Según parece, la mayor parte de los futuros combustibles líquidos procederán de esquistos bituminosos y carbón licuado, que son combustibles intrínsecamente bajos en hidrógeno. ¿Podremos quemarlos a gran escala sin enterrarnos en carbonilla?

La carbonilla se forma en tres etapas. En todas las llamas hidrocarbonadas decrece la relación hidrógeno-carbono de las moléculas de hidrocarburos y radicales a medida que se van descomponiendo por el calor y el ataque químico. Las últimas de las cuales son típicamente moléculas como el acetileno ($C_2H_2$) y fragmentos tales como el radical etilo ($C_2H$). En una llama productora de carbonilla, semejantes moléculas y radicales no se oxidan; en la primera etapa de la formación de carbonilla, polimerizan en su mayor parte y forman poliacetilenos y sus radicales, mediante reacciones del estilo $C_2H + C_2H_2 \rightarrow C_4H_2 + H$, y luego $C_2H + C_4H_2 \rightarrow C_6H_2 + H$. Moléculas características de una llama productora de carbonilla son también un amplio abanico de compuestos poliaromáticos (en los que los átomos de carbono están ordenados en múltiples anillos) y los iones hidrocarbonados positivos.

Después de un determinado tiempo de espera, desaparecen algunas moléculas de éstas y surge en una segunda etapa un aerosol de carbonilla: partículas esféricas que contienen cantidades variables de hidrógeno e hidrocarburos atrapados, según el tipo de llama. Las partículas de aerosol dan a las llamas fuliginosas su opacidad y, por tanto, son responsables de su brillo amarillo. Las esferas no pueden crecer más allá de un diámetro de una décima de micra, debido al agotamiento del carbón en el gas de la llama; las partículas, mayores, que constituyen el humo negro de la tercera etapa están formadas por aglomeración de las partículas del aerosol. Partículas y aglomerados se fortalecen mientras están calientes, perdiendo hidrógeno y material orgánico y dando lugar a estructuras cada vez más rígidas, que en algunas llamas empiezan a parecerse a la estructura laminar del grafito. También pueden oxidarse fácilmente y, en muchas llamas, como las de las bujías o de los hornos industriales que queman bien, desaparecen por completo.

Las pruebas en que se sustenta esta descripción arrancan de dos fuentes: análisis de la composición molecular e iónica de los gases de la llama y de los sistemas formadores de carbonilla mencionados (antes de la aparición de dicho aerosol) y estudios químicos de las partículas de carbonilla obtenidas en las etapas últimas del proceso. El investigador se encuentra, pues, aislado ante dos aspectos clave de la llama: los pasos por los que las moléculas de hidrocarburos, radicales e iones se agrupan en primer lugar para formar un aerosol y la competencia entre el endurecimiento, aglomeración y oxidación posterior de las partículas de aerosol en la llama. Las moléculas mayores que pueden detectarse en las llamas encierran unas dos o tres docenas de átomos de carbono; las partículas más pequeñas que pueden existir como aerosoles poseen quizá un millón. No hay acuerdo aún sobre un esquema coherente de cómo las moléculas se convierten en partículas de carbonilla. Las partículas del aerosol constituyen una colmena de actividad química cuya caracterización nunca puede darse por terminada.

El petróleo y el gas natural no continuarán dominando el escenario energético durante muchos años más. El alcohol ya se utiliza como combustible. Pronto nos acostumbraremos a otros combustibles sintéticos hechos a partir de carbón, biomasa, esquistos, arenas alquitranosas y basuras. Pero, ¿y su precio? ¿Serán tan caros que constituirán un lujo, o se verán reemplazados por depósitos de energía no combustible, como baterías o pilas de combustible?

Hay fundadas razones para pensar que los combustibles líquidos continuarán siendo hidrocarburos y que seguirán quemándose como ahora, al menos como fuentes móviles de energía, aun cuando tengan que sintetizarse. La causa yace en que nadie ha descubierto ningún sustituto que prometa una combinación de comodidad y alta densidad energética como la de éstos. La hulla, el carbón vegetal y el uranio son adecuados para quemar en centrales energéticas estacionarias; los sustitutos del gas para calefacción pueden resultar económicos. A pesar de todo, los hidrocarburos parece que persistirán como la forma óptima de almacenar energía en automóviles y aviones. La principal diferencia entre los líquidos derivados del petróleo que quemamos y los combustibles sintéticos que nuestros hijos y nietos quemarán será probablemente que los combustibles sintéticos tendrán menos hidrógeno y, por tanto, una mayor tendencia a producir carbonilla. ¿Cómo salvar ese escollo? He ahí el próximo reto de los ingenieros de combustión. ¿Cómo desentrañarlo? Tal será la prueba de fuego de los químicos que trabajen en este campo.

# Los quasars, sondas del universo distante y primitivo

*La luz procedente de la mayoría de esos enigmáticos objetos se emitió hace 15.000 millones de años. Constituyen, por tanto, una prueba única del aspecto que el universo tenía cuando su edad era sólo una cuarta parte de la actual*

Patrick S. Osmer

Diecinueve años después de su descubrimiento por Maarten Schmidt, los quasars son, todavía, uno de los grandes enigmas de la astronomía. Se sigue debatiendo su naturaleza; pero todos coinciden a la hora de describirlos: se trata de objetos semejantes a estrellas que presentan un gran corrimiento hacia el rojo. La luz que emiten está fuertemente desviada hacia el extremo rojo del espectro, lo que significa que se están alejando a una velocidad que vale un porcentaje substancial de la velocidad de la luz. Si son tan remotos como indican sus grandes corrimientos hacia el rojo, los quasars deben estar mucho más alejados que las galaxias ordinarias, cuyos propios corrimientos hacia el rojo anuncian la expansión general del universo. Uno solo brilla hasta 1000 veces más que una galaxia entera que contenga 100.000 millones de estrellas. La luz procedente de los quasars más distantes inició su viaje cuando el universo tenía la cuarta parte de la edad actual y ha invertido 15.000 millones de años en llegar hasta nosotros.

No es mi intención discutir en este artículo la difícil física de la naturaleza de los quasars. Prefiero concentrarme en cuanto puedan ellos decirnos acerca del universo distante y sus condiciones en la época primitiva. Adoptaré la hipótesis de trabajo de que los quasars son los núcleos extremadamente brillantes de galaxias, muy alejadas por lo demás para ser observadas. Rodeando a algunos, débiles y bastante próximos, se detectan señales de galaxia; pero los quasars distantes y luminosos sólo se pueden distinguir de las estrellas a través de sus propiedades espectrales. Distinguirlos de las estrellas planteó a los astrónomos un problema difícil. Una sola fotografía de gran campo del cielo tomada con un gran telescopio de Schmidt (llamado así por su sistema óptico, inventado en el decenio de 1920 por Bernhard Schmidt) mostrará al menos 200.000 imágenes estelares, de las que sólo algunos centenares serán los objetos que nos ocupan.

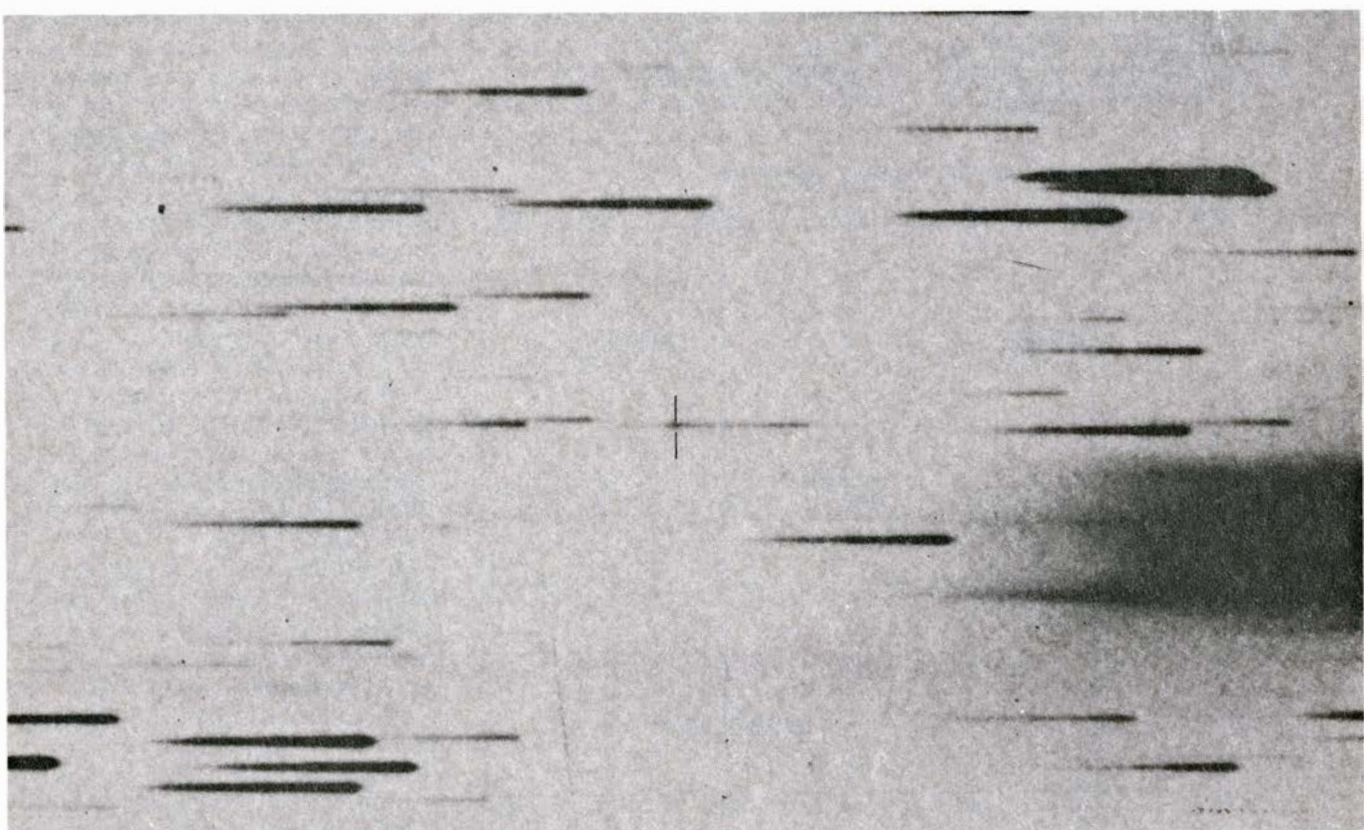
Los quasars originales fueron hallados por astrónomos ópticos mientras andaban a la caza de radiofuentes celestes. A medida que mejoraron las técnicas de radio, las posiciones asignadas a las radiofuentes se hicieron cada vez más exactas; en muchos casos, apuntaban a determinadas imágenes estelares de las placas fotográficas. Puesto que las estrellas normales no podían detectarse como fuentes de radioemisión con el equipo entonces disponible, la coincidencia de una radiofuente con un objeto estelar resultaba una buena manera de separar los quasars de las estrellas. Resultó así que la mayoría de los quasars identificados por primera vez eran intensas radiofuentes, de donde les vino el nombre (*qua*si-*s*tell*ar* radio source, radiofuente cuasi-estelar).

Pronto se descubrió, sin embargo, que una población de quasars mucho más nutrida eran radioemisores débiles, por cuya razón habían escapado a la detección de los radiotelescopios. Allan P. Sandage, trabajando con el telescopio Hale de 5 metros del Monte Palomar, halló que emitían mucha más radiación ultravioleta que las estrellas ordinarias; consiguientemente, se podían identificar comparando las imágenes estelares sobre placas fotográficas sensibles al ultravioleta con las correspondientes imágenes en placas ordinarias, que responden principalmente a la luz en el extremo azul del espectro visible. Sandage observó que los quasars poco activos a las longitudes de onda de radio excedían grandemente en número a los que mostraban intensa radioemisión.

Recientemente se ha desarrollado un nuevo método óptico para descubrir quasars de gran corrimiento hacia el rojo, complementario del método basado en su brillo en el ultravioleta. El método se desarrolló de una manera fortuita a raíz de un proyecto que Malcolm G. Smith y el autor iniciaron hace varios años, en el que estaba empeñada la búsqueda de ciertas galaxias cuyos espectros presentaban fuertes líneas de emisión, en vez de líneas de absorción, que son más características. La búsqueda se llevó a cabo con el telescopio Curtis Schmidt de 60 centímetros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo en Chile, junto con dos telescopios reflectores mayores, de 1,5 y cuatro metros. Smith se proponía fotografiar los espectros de objetos débiles sobre un gran campo colocando un delgado prisma, que se acababa de adquirir, sobre la apertura de entrada del telescopio Schmidt.

El método de ensanchar las imágenes de estrellas, normalmente puntuales, por medio de un prisma colocado frente al objetivo, ha gozado de una larga y distinguida historia en el ámbito de la astronomía estelar. ¿Dónde radicaba la novedad del método de Smith? En la combinación de un prisma de baja dispersión (para conservar la luz de los objetos débiles) y de las placas fotográficas de reciente consecución, dotadas de grano fino y elevado contraste. Esta combinación, sumada a las excepcionales condiciones de observación en Cerro Tololo, hicieron posible fotografiar espectros de objetos más débiles que los que se hubieran podido registrar con un telescopio de tamaño tan modesto como el Curtis Schmidt. Una vez identificadas por este método las galaxias con líneas de emisión, podíamos examinar en detalle sus caracte-





METODO PARA HALLAR QUASARS ilustrado a través de estas dos fotografías tomadas con el telescopio Curtis Schmidt del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo en Chile. En una fotografía directa del cielo no se pueden distinguir las estrellas de los quasars, porque ambos aparecen como puntos luminosos, como pasa en el negativo. Cuando se coloca un prisma delgado en la apertura del telescopio Schmidt, la imagen de cada objeto se dispersa formando un espectro, como en el negativo de la misma parte del cielo en la parte inferior. En éste, las longitudes de onda mayores del extremo rojo del espectro están a la derecha y las longitudes de onda más cortas del extremo violeta del espectro, a la izquierda. Los espectros de las estrellas no presentan características especiales o bien muestran bandas blancas, poniendo así de manifiesto que se ha absorbido alguna emisión estelar. El quasar, indicado por barras en ambas fotografías, se revela conspicuo porque una fuerte línea de emisión, la Lyman-alfa del hidrógeno, ha sido trasladada desde su posición normal en la región del ultravioleta extremo, a 1216 angstrom, hasta el umbral del espectro visible, a 3720 angstrom, lo que corresponde a un corrimiento hacia el rojo de 2,06. Este quasar particular, QO 149-397, fue descubierto por Malcolm G. Smith con el prisma en el telescopio Schmidt.

rísticas espectrales en los espectros de alta dispersión proporcionados por los telescopios mayores.

Examinando las placas de gran campo del Schmidt, Smith observó que, además de las galaxias de líneas de emisión que cabía esperar, había algunos objetos, posiblemente quasars, con líneas de emisión en posiciones inesperadas en sus espectros. Al examinar más atentamente dichos objetos en los telescopios grandes con ayuda de un espectrómetro Vidicon (cámara de televisión intensificada), que el autor había estado adaptando para el proyecto, descubrimos que se trataba de quasars con gran corrimiento hacia el rojo. La técnica de Smith proporcionaba así un método directo y eficaz para distinguir los quasars de las estrellas en las placas de gran campo. Además, el método era más eficaz para distinguir los quasars con gran corrimiento hacia el rojo que el basado en el brillo en el ultravioleta.

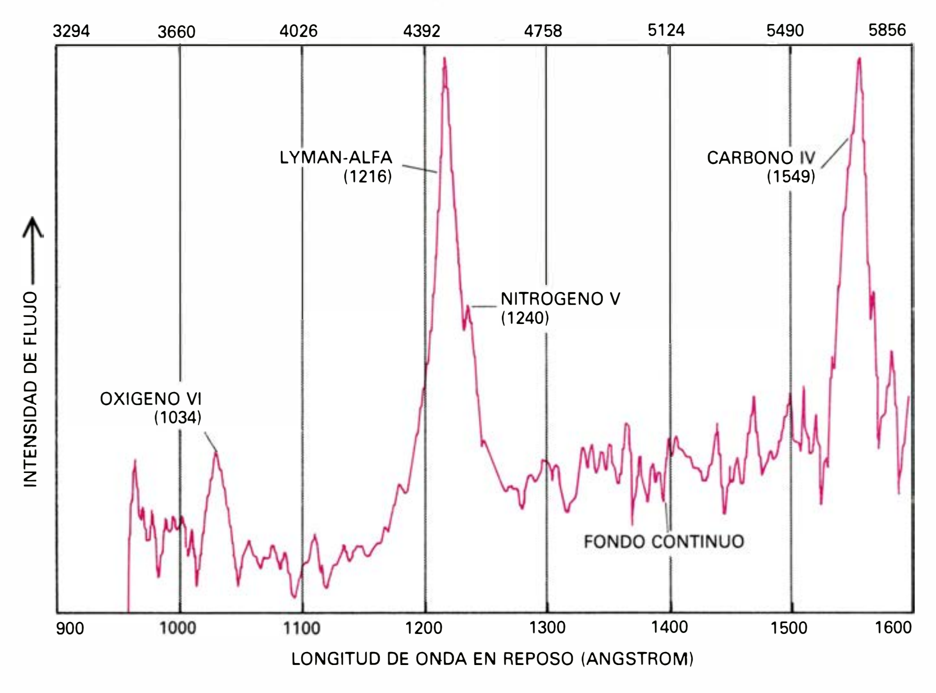
Exploró luego una larga franja del cielo austral con el telescopio Curtis Schmidt. Con Arthur A. Hoag, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, extendió la búsqueda a magnitudes más débiles en pequeños campos de exploración del Schmidt, colocando una red de difracción (equivalente a un prisma) en el foco primario del telescopio de cuatro metros de Cerro Tololo. Por mi parte, proseguí examinando los quasars descubiertos en las dos búsquedas con el espectrómetro Vidicon, más sensible. Las observaciones combinadas constituyen la base de los nuevos resultados que se describen a continuación.

Los espectros de los quasars no se parecen a los de ningún otro objeto astronómico. El gran corrimiento hacia el rojo pone a la vista regiones del espectro ultravioleta extremo nunca registradas con anterioridad por telescopios emplazados en la Tierra. El valor del corrimiento hacia el rojo, frecuentemente designado por *Z*, se obtiene restando la longitud de onda correspondiente al reposo (es decir, la longitud de onda sin corrimiento) de una línea de emisión de su longitud de onda observada y dividiendo la diferencia por el valor de la longitud de onda en reposo. La característica más intensa en los espectros de quasars es la línea Lyman-alfa del hidrógeno atómico, desviada en un factor de hasta 4,5 respecto a su posición normal, definida a la longitud de onda de 1216 unidades angstrom en el ultravioleta hasta unos 5500 angstrom, longitud de onda de la luz verdoso-amarillenta. En tal caso *Z* valdría 3,5 (5500 menos 1216 dividido por 1216). Las líneas de emisión del oxígeno, nitrógeno y carbono con longitudes de onda normales en el ultravioleta entre 1034 y 1549 angstrom son también prominentes en el espectro de los quasars con grandes corrimientos hacia el rojo.

En muchos casos, además, las líneas de emisión son anchas, lo que indica que parte del gas que rodea el quasar se está moviendo a velocidades de hasta 10.000 kilómetros por segundo. Las condiciones físicas deducidas de las intensidades de las diversas líneas muestran que el gas está más caliente que en las nebulosas normales y que la fuente central en el quasar de ninguna manera radia como lo hace una estrella normal. A efectos de esta explicación, sin embargo, el punto principal es que la línea Lyman-alfa constituye la característica predominante en los espectros de los quasars; por tanto, es la que más fácilmente se detecta en las placas tomadas con el instrumento Schmidt y el prisma frente al objetivo. Por esta razón, el método del prisma frente al objetivo favorece la detección de quasars con grandes corrimientos hacia el rojo.

Si los corrimientos hacia el rojo se interpretan como velocidades de alejamiento, el necesario para trasladar la radiación Lyman-alfa hasta 3648 angstrom en la región del ultravioleta próximo del espectro, equivalente a un corrimiento hacia el rojo de 2, corresponderá a un 80 por ciento de la velocidad de la luz. OQ 172, el quasar con el mayor corrimiento hacia el rojo conocido, 3,53, está alejándose, evidentemente, a un 91 por ciento de la velocidad de la luz. En la misma escala, las estrellas dentro de las galaxias tienen velocidades de 0,1 por ciento de la velocidad de la luz; las galaxias próximas se están apartando de nosotros a velocidades no superiores al 1 por ciento de la velocidad de la luz.

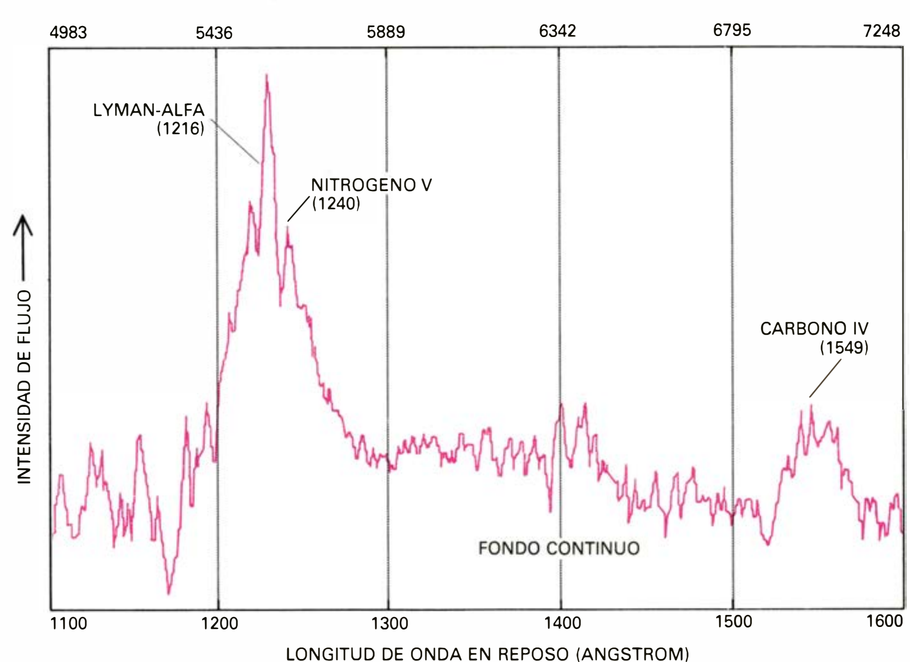
En más de un cuarto de siglo de mediciones de corrimientos hacia el rojo galáctico, con el telescopio de 2,5 metros de Monte Wilson y con el de 5 metros de Monte Palomar, el máximo valor registrado por Milton L. Humason fue un corrimiento hacia el rojo de 0,2, obtenido en 1949. Pasaron otros 11 años antes de que Rudolph Minkowski, también trabajando con el telescopio de 5 metros, llevara el límite hasta 0,46, marca que permaneció durante muchos años. En el intervalo de dos años tras el descubrimiento por M. Schmidt del primer quasar, 3C 273, en 1963, con un corrimiento hacia el rojo bastante modesto, de 0,158, la "barrera" del corrimiento 2 se había roto; el actual valor máximo de 3,53 se registró en 1973.




**REVELAN LOS ESPECTROS DE LOS QUASARS que los átomos emisores están ionizados (despojados de electrones) con intensidad mayor que los átomos de las nebulosas que rodean las estrellas, jóvenes y calientes, de nuestra propia galaxia. Las líneas de emisión, además, están fuertemente corridas hacia el extremo rojo del espectro a partir de su longitud de onda normal o en reposo. Este espectro del quasar QO 453-423 fue tomado, con el sistema de cámara Vidicon, en el telescopio de 1,5 metros en Cerro Tololo. La intensa línea Lyman-alfa del hidrógeno ionizado se ha trasladado hacia el rojo hasta 4451 angstrom, en la parte azul del espectro visible, desde su longitud de onda normal de 1216 angstrom en el ultravioleta extremo. Esto corresponde a un corrimiento hacia el rojo de 2,66 (obtenido restando 1216 de 4451 y dividiendo por 1216). Los espectros muestran que las emisiones de oxígeno VI, nitrógeno V y carbono IV están corridas hacia el rojo. En romanos, el número de electrones arrancados del átomo, más uno.**

Si los corrimientos hacia el rojo de los quasars se suponen debidos a la expansión del universo, no serán objetos próximos que se estén moviendo a velocidades extremadamente altas, sino objetos lejanísimos. Tal se deduce, de forma inmediata, de la conclusión a que llegó Edwin P. Hubble en 1929: las galaxias se están alejando de nosotros (y entre sí) a velocidades proporcionales a sus distancias. Hubble había fundado gran parte de su razonamiento en las observaciones de Humason. Arrancando de la actual escala del Universo, una galaxia con un corrimiento hacia el rojo de 0,01 (o una velocidad aparente de alejamiento de 3000 kilómetros por segundo) se hallaría a unos 200 millones de años-luz de distancia; un valor muy considerable, si tenemos en cuenta que la galaxia espiral más cercana, la de Andrómeda, dista de nosotros apenas dos millones de años-luz. Los quasars están enormemente más alejados; con los máximos corrimientos hacia el rojo se acercan al horizonte, o límite, del universo observable.




**MAXIMO CORRIMIENTO HACIA EL ROJO de cualquier objeto celeste conocido: 3,53; corresponde al quasar OQ 172. Su espectro, obtenido con el telescopio de cuatro metros de Cerro Tololo, muestra que la línea Lyman-alfa ha sido trasladada desde una longitud de onda de 1216 angstrom hasta otra de 5508 angstrom, en la parte verde del espectro visible. Las numerosas líneas de absorción a la izquierda de la línea Lyman-alfa son producidas por nubes de gas situadas en la visual entre el quasar y el sistema solar.**

La medida de distancias en astronomía ha constituido siempre un problema. Tan sólo las de las estrellas más próximas se han calculado por trigonometría, a la manera del topógrafo que mide distancias en la tierra; cualquier cosa que se halle más allá de esas estrellas, se ha extrapolado. Nadie mantiene que los corrimientos hacia el rojo revelen las distancias absolutas de las estrellas, pero se acepta que se trata de un buen instrumento para calibrar las distancias relativas.

La idea de universo en expansión implica que un objeto con un gran corrimiento hacia el rojo se está observando tal como era hace mucho tiempo. La luz que ahora nos alcanza procedente de un quasar con un corrimiento hacia el rojo de 3 se emitió hace unos 15.000 millones de años. La luz de un quasar con un corrimiento hacia el rojo de valor unidad ha estado viajando durante 10.000 millones de años, es decir, la mitad de la edad del universo.

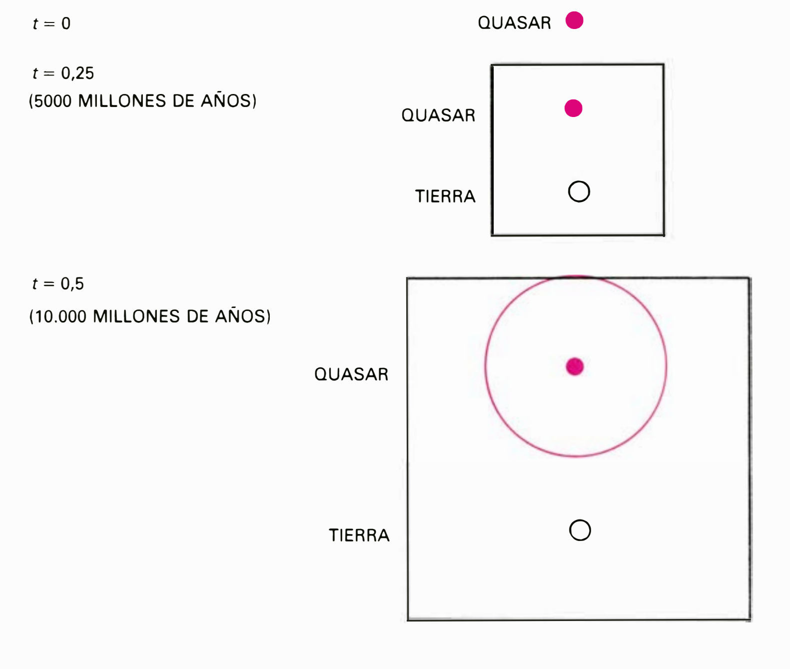
Consecuencia ulterior del universo en expansión es que el corrimiento hacia el rojo proporciona una medida directa del factor de expansión. Cuando la luz se emitió de un quasar con un corrimiento de 3, el universo tenía un tamaño de sólo la cuarta parte del que posee hoy, es decir, todo estaba cuatro veces más próximo que ahora. La distribución de corrimientos hacia el rojo en los quasars aporta, pues, varias claves para desentrañar la estructura y tamaño del primitivo universo. Me apresuro a añadir que los pormenores de las relaciones matemáticas entre los corrimientos hacia el rojo observados y las propiedades del universo son, además de complicadas, cuestionables, pues se trata de hipótesis insuficientemente fundadas ya que se deducen de un conjunto de datos de observación todavía limitado. Pero hay puntos de la investigación que poseen cierta independencia respecto a esos detalles; en ellos vamos a centrar nuestra atención.

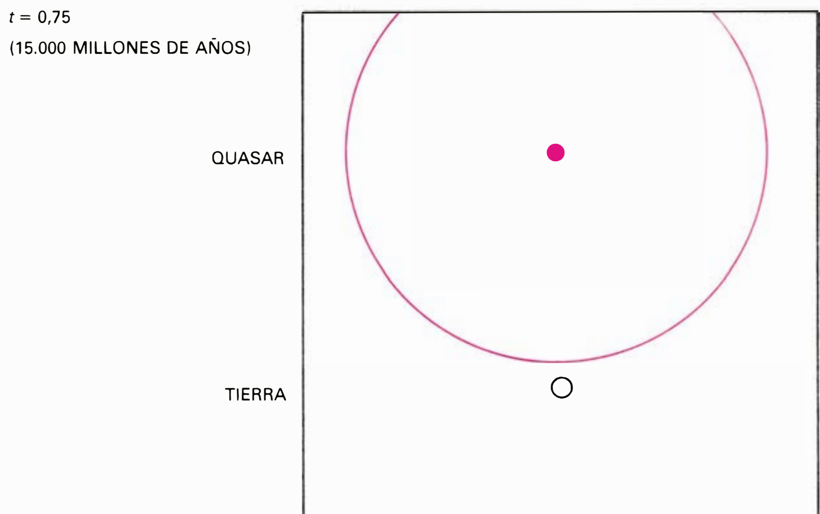
En los primeros años de la investigación de los quasars, muchos astrónomos habían puesto su esperanza en que tales objetos contribuirían a decidir cuál de las muchas hipótesis posibles acerca de la evolución del universo era la correcta. Esperanza que no tuvo cumplimiento. Mas, a fines del decenio de 1960, Maarten Schmidt descubrió una característica singular de los quasars lejanos: su número en el espacio muy distante superaba con mucho a cuantos se registraban en nuestra vecindad. Para un corrimiento hacia el rojo de 2, es decir, hace unos 13.000 millones de años, su densidad era 1000 veces mayor de lo que es ahora. Evidentemente, cualquiera que fuera el proceso que originó los quasars, debió mostrarse sumamente activo en la juventud del universo y ha ido amortiguándose hasta casi anularse hoy.

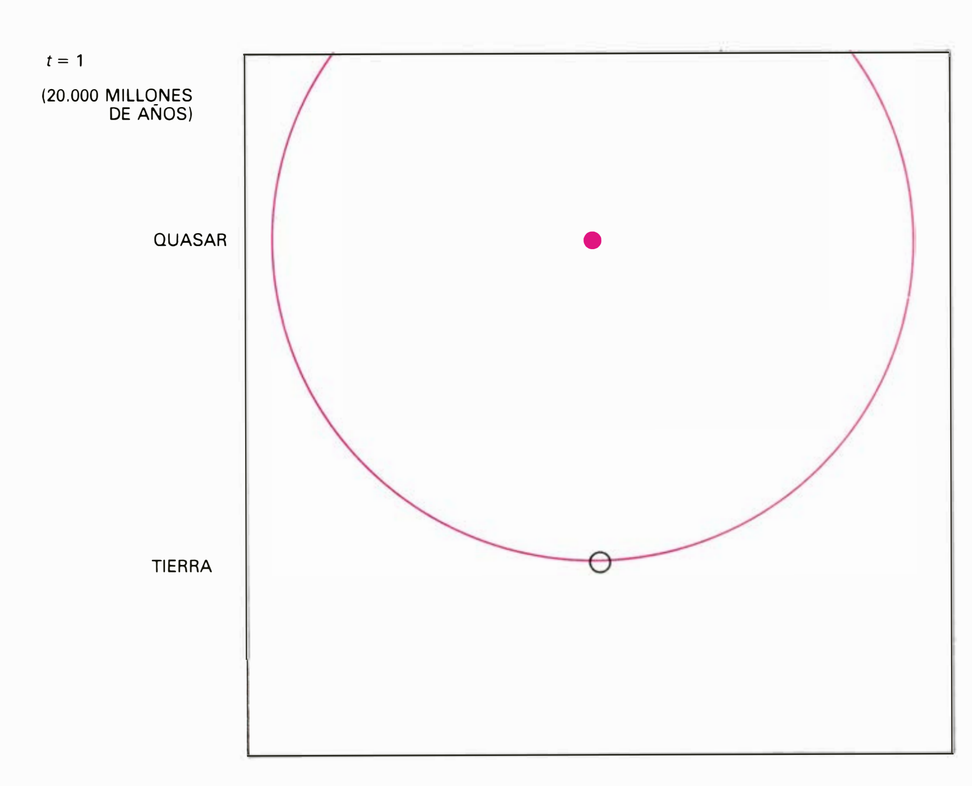
Por los años en que Maarten Schmidt investigaba la densidad espacial de los quasars, el mayor corrimiento hacia el rojo conocido era de 2,88. Aun tratándose de valor muy alto, en comparación con lo que se había esperado apenas unos años antes, su resultado sugirió que debía haber multitud de quasars con corrimientos mucho mayores. ¿Por qué no se detectaban los quasars con corrimientos hacia el rojo de 3 o más? Tanto Schmidt como Sandage llamaron la atención sobre este punto y sugirieron que los corrimientos hacia el rojo de los quasars podrían tener un límite.

Las implicaciones de tal límite eran de extrema importancia. Significaba que, al menos para un tipo de objeto, los astrónomos estaban observando los lindes del universo. Parecía como si los quasars se hubieran formado bruscamente en un gran brote de actividad hace unos 15.000 millones de años. Noción que pesaría grandemente en las ideas acerca de la naturaleza fundamental de los quasars. Si admitimos, además, que los quasars representan procesos enormemente energéticos del centro de las galaxias, el límite del corrimiento hacia el rojo comporta consecuencias importantes respecto a la evolución de las propias galaxias.

Los astrónomos continuaron buscando quasars de desplazamientos todavía mayores. Les preocupaba, lógicamente, que el límite aparente pudiera resultar de algún efecto de selección en los métodos de identificación, aun cuando los quasars conocidos habían sido descubiertos en exploraciones ampliamente heterogéneas basadas en métodos




distintos. El núcleo de la disputa lo constituía la cuestión de si los quasars con corrimientos hacia el rojo mayores que 2,5 o 3 continuarían brillando más en el ultravioleta que las estrellas corrientes. El quasar con un corrimiento de 2,88 no tenía un particular exceso ultravioleta; ahora bien, como su más intensa línea de emisión, la Lyman-alfa, se había trasladado hacia la parte central del espectro visible, se haría difícil distinguir entre las estrellas normales y el quasar y otros objetos parecidos.

Verdad es que, cuando en 1973 se descubrió el quasar con corrimiento de 3,53, resultó de color rojo. Y se pudo identificar gracias a que los radioastrónomos habían determinado su posición con gran exactitud. De haberse tratado de un quasar radiosilencioso, nadie hubiera reparado en él. Su descubrimiento, unido a ciertas dudas sobre si las primitivas exploraciones eran suficientemente completas, mantuvo como cuestión no resuelta la realidad de un límite en el corrimiento hacia el rojo.

La aplicación de nuestro método del prisma frente al objetivo en Cerro Tololo ofreció un nuevo enfoque del problema. Al fundarse en la mera detección de líneas de emisión, no dependía en absoluto del color del quasar, fuese o no ultravioleta. Como todo método también el nuestro estaba sesgado, pero estas predisposiciones propias eran, por lo menos, distintas de las que afectaban a todas las demás búsquedas.

El método del prisma frente al objetivo detectaba la línea Lyman-alfa de los quasars aunque estuviera tan situada hacia la región roja del espectro cuanto lo permitieran las emulsiones fotográficas. La emisión elegida por Hoag y Smith para su búsqueda a fondo con el telescopio de cuatro metros respondía a la línea Lyman-alfa aunque se hallara a 6900 angstrom, equivalente a un corrimiento hacia el rojo de nada menos que 4,7. Sin embargo, ninguno de los 71 nuevos quasars hallados en su

**DIBUJO ESQUEMATICO DEL UNIVERSO en diferentes épocas. Nos sirve para explicar cómo los quasars pueden proporcionar indicios sobre las condiciones existentes en tiempos muy remotos. La luz que ahora alcanza la Tierra procedente de un quasar con un corrimiento hacia el rojo de 3 se emitió hace unos 15.000 millones de años, sólo 5000 millones de años después de la hipotética gran explosión que inició la expansión del universo desde un estado denso ($t = 0$). A la edad de 5000 millones de años, el universo tenía solamente una cuarta parte de su tamaño actual. Las circunferencias en color muestran la distancia recorrida por la radiación procedente del quasar a medida que el universo se expandía y el quasar y nuestra galaxia se alejaban entre sí. La radiación, finalmente, alcanza un hipotético telescopio situado en la Tierra.**

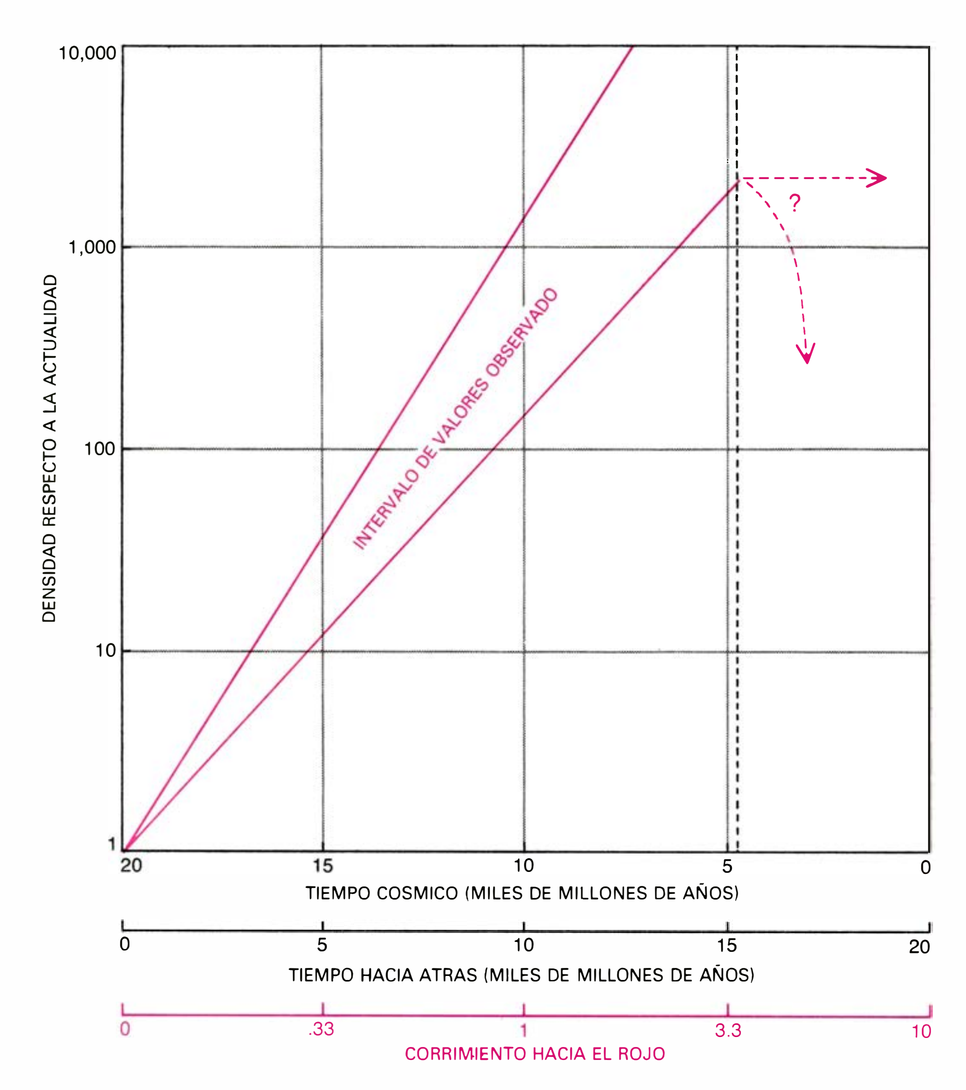
exploración presentaba un corrimiento superior a 3,45, que, aunque próximo, no superaba el límite anterior. Por sugestivo que fuera ese resultado, Robert F. Carswell, de la Universidad de Cambridge, y Smith mostraron después que la exploración Hoag-Smith carecía, para los corrimientos hacia el rojo superiores a 3,5, de sensibilidad suficiente para requerir que su densidad decreciera. Se imponía, pues, una nueva exploración.

El autor realizó observaciones con el telescopio de cuatro metros de Cerro Tololo en un programa optimizado para hallar quasars con corrimientos hacia el rojo entre 3,7 y 4,7, en el caso de que existieran.

Trabajando con una red de difracción de transmisión y de sensibilidad mayor en la región de los 6000 angstrom, más un filtro para eliminar la luminiscencia del cielo a longitudes de onda inferiores a 5700 angstrom, pude detectar quasars en la región crítica de 5700 a 6000 angstrom tres veces más débiles que los que pudieron detectar Hoag y Smith. Se hallaron 15 objetos con líneas de emisión; cualquiera de ellos podía superar la cota de 3,5. Pero observaciones subsiguientes con la cámara Vidicon mostraron que en ningún caso la línea Lyman-alfa era la detectada en la placa fotográfica. En cinco objetos, la línea resultó proceder del carbono en quasars con corrimientos de entre 2,8 y 3,4; los restantes eran o bien quasars con corrimientos hacia el rojo próximos a 1 o galaxias con corrimientos hacia el rojo en la vecindad de 0,2. Aunque estos resultados eran decepcionantes en un sentido, reforzaron la confianza de que se habrían podido detectar quasars con corrimientos hacia el rojo de hasta 4 en la hipótesis de que los hubiera. Todos los nuevos quasars se descubrieron por detección de líneas que eran más débiles que la Lyman-alfa, lo que constituía un cambio total respecto a las búsquedas anteriores con objetivo prismático.

Al realizar luego el análisis cuantitativo de los resultados de la nueva exploración, observé que sólo podían interpretarse admitiendo que la densidad espacial de quasars con corrimiento hacia el rojo superior a 3,5 fuese una tercera parte o menos de la densidad registrada para corrimientos hacia el rojo de 3. El límite no impide que, en el futuro, podamos hallar quasars más distantes, pero muestra con nitidez que hemos llegado al punto de retorno.

Otro punto de apoyo donde descansar la hipótesis del límite del corrimiento hacia el rojo lo tenemos en el fracaso de los radioastrónomos a la hora de descubrir quasars más lejanos, no obstante poseer ya posiciones extremadamente precisas que les permiten prescindir del color de los candidatos a quasar. Recientemente han entrado en liza los astrónomos de rayos X con datos recogidos por el satélite de rayos X, el Observatorio Einstein. Aunque el telescopio de rayos X del satélite cartografió fácilmente OQ 172, el quasar más distante y varios otros con corrimientos hacia el rojo próximos a 3,1, no encontró nada capaz de batir la marca. El próximo gran avance puede venir con el Telescopio Espacial, que está previsto entre en órbita en 1985. Quizá nos diga cuán cerca del límite se halla el máximo actual.




**DENSIDAD DE QUASARS hace 15.000 millones de años, cifrada en más de 1000 veces la de hoy, según los cálculos de Maarten Schmidt, quien descubrió el primer objeto de éstos en 1963. La ausencia de quasars con un corrimiento hacia el rojo superior a 3,5 implica que los astrónomos han sondeado el universo hasta la primitiva época de formación de quasars. Se conocen ahora unas 1500 unidades.**

El trabajo que venimos realizando en Cerro Tololo revela que la densidad de quasars en el espacio mantiene su valor alto hasta corrimientos hacia el rojo de 3,2. A 3,5, la situación implica un cambio brusco en las propiedades del universo. ¿A qué obedece ello? La explicación más sencilla afirma que los quasars se formaron de repente hace 15.000 millones de años, lo que habría sido, sin duda, un acontecimiento notable en la evolución del universo. Mas, cabe también que haya una pantalla absorbente del polvo u otra clase de material que limite el corrimiento hacia el rojo a 3,5 e impida la visión de quasars más distantes. Pero resultaría paradójico que el universo fuera transparente a un lado del límite y opaco al otro. En cualquier caso, es plausible que la continuación del trabajo sobre este tema aporte datos esclarecedores en los próximos años.

Nos hemos ceñido hasta ahora a la distribución radial de los quasars, que es la manera como históricamente se desarrolló su estudio. Mas una vez investigadas ya exhaustivamente las muestras de quasars de Cerro Tololo, disponemos de un conjunto de datos a grandes corrimientos hacia el rojo que nos faculta para echar un vistazo a la distribución tridimensional de los qua-

sars. Combinando los corrimientos hacia el rojo con las posiciones de los quasars en el cielo, se puede construir un cuadro tridimensional de la distribución de los quasars en el espacio. Esta es la única información disponible sobre la estructura del Universo de hace 13.000 a 15.000 millones de años. La distribución tridimensional proporciona también valiosas pistas sobre la naturaleza de los propios quasars.

Si uno mira a la distribución de galaxias en fotografías que muestren grandes regiones del cielo, advierte que las galaxias carecen de un reparto uniforme. Aparecen en parejas, en grupos pequeños, en otros mayores y en grandes cúmulos; abundan las regiones en blanco, con pocas o ninguna galaxias. El estudio de la distribución galáctica resulta decisivo a la hora de elaborar teorías sobre su formación. Los datos de que disponemos indican que, en las fases muy tempranas del universo, la materia estaba distribuida uniformemente en forma de gas. ¿Cómo se produjeron luego las condensaciones, de las que surgieron las estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias en el curso de la expansión del universo?

Una vez que se ha producido una condensación, con suficiente autogravitación para resistir la expansión del universo, pueden imaginarse diversas maneras en que podría contraerse bajo su propio peso, por decirlo así, para formar una estrella o incluso toda una galaxia de estrellas. La mayoría de los cálculos muestran que en cuanto una masa de gas comienza a contraerse, la caída de materia hacia el interior es veloz y conduce a un rápido crecimiento de la densidad. Si la caída hacia el interior del gas tiene magnitud galáctica, es fácil imaginar que un colapso incontrolado de materia cree un quasar en el centro de la galaxia como parte de la evolución de ésta. Vemos ahí una posible relación entre los quasars y la formación de galaxias. Cabe también que los quasars posean fuerza suficiente por sí mismos para condicionar los procesos de formación en una escala considerablemente mayor que la de una galaxia aislada. En tal caso, la distribución de quasars podría diferir de la distribución de galaxias, observable sólo en una época muy posterior en el proceso de expansión del universo.

Para hacernos una primera idea de cómo están distribuidos los quasars, echemos un vistazo a los datos obtenidos de Cerro Tololo en diferentes clases de representación. La porción de cielo cubierta por las exploraciones de Cerro Tololo se extiende a lo largo de una faja que queda entre los 37,5 y 42,5 grados Sur de latitud celeste, porción que abarca una cuarta parte del paralelo celeste [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*]. La banda se registró en una secuencia de unas 15 placas que se superponían ligeramente, tomadas con el telescopio Curtis Schmidt; cada placa cubre un campo de cinco grados por lado. (Las dos estrellas del final de la vara del Carro, que apuntan hacia la Estrella Polar, están



**CUMULO DE GALAXIAS DEL CENTAURO, uno de los muchos que hay. Aparece en esta fotografía obtenida con el telescopio de cuatro metros de Cerro Tololo. El cúmulo del Centauro, que está a una distancia de unos 225 millones de años-luz, aloja unas 250 grandes galaxias, separadas típicamente por distancias de unos 700.000 años-luz. La comprensión del proceso de acumulación aclararía la formación de las galaxias en el universo temprano.**

separadas por casi la misma distancia angular.) El gran reflector de cuatro metros hizo exploraciones profundas en siete regiones pequeñas, cada una de aproximadamente un grado de lado, dentro de la ancha banda fotografiada con el Curtis Schmidt. Para entendernos, el telescopio de cuatro metros tomó muestras de largos y delgados tubos en el espacio.

La exploración Curtis Schmidt reveló 88 quasars con corrimientos hacia el rojo de 1,8 o superiores. En una región mucho más pequeña, la exploración con el instrumento de cuatro metros identificó 53 quasars con corrimientos hacia el rojo comparables, incluidos los seis que se hallaron en la exploración Schmidt. (Algunos de los quasars más brillantes identificados en ambas exploraciones los habían descubierto antes otros astrónomos.) La exploración Curtis Schmidt detectó un quasar con gran corrimiento hacia el rojo por cada cuatro grados cuadrados de cielo, aproximadamente; la exploración con el de cuatro metros reveló unas 40 veces el número anterior de quasars por unidad de superficie explorada, lo que correspondía a unos 10 quasars con corrimiento hacia el rojo grande por grado cuadrado.

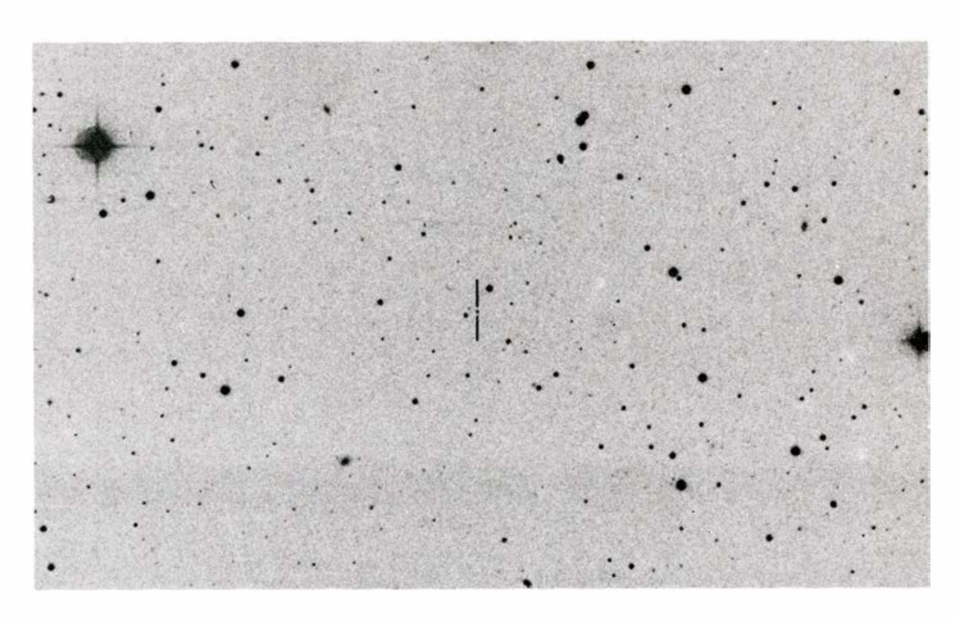
La razón de que el sistema de cuatro metros descubriera mayor número de quasars residía, naturalmente, en su capacidad de identificar objetos bastante más débiles. La exploración con este sistema sondeó hasta una magnitud límite de 21, revelando con ello objetos de 1,5 magnitudes, esto es, 4 veces más débiles que los que se podían registrar con el telescopio Schmidt. Aunque los quasars hallados en la exploración de cuatro metros solían ser más débiles que los encontrados en la exploración con el Schmidt, no significa que presentaron, en general, un corrimiento mayor hacia el rojo. Gran parte de los 135 quasars en la exploración combinada ofrecían un valor de desplazamiento próximo a 2. Lo que era de esperar, habida cuenta de que el método de búsqueda favorecía el descubrimiento de tales quasars y considerando también que los quasars de ese corrimiento hacia el rojo son evidentemente los más abundantes. Los 135 quasars examinados en estas exploraciones de Cerro Tololo vienen a cifrar la cuarta parte de todos los quasars descubiertos hasta ahora con corrimientos hacia el rojo superiores a 1,8.

Para obtener un cuadro de la distribución real de quasars en el espacio, hemos representado los 88 de la exploración Schmidt en un sólido tridimensional en forma de tarta [*véase la ilustración superior de la página siguiente*]. La cara anterior del sólido es un arco que sitúa los 88 quasars según su declinación, o latitud, y ascensión recta (equivalente astronómico de la longitud, que divide la esfera celeste en 24 husos, cada uno de 15 grados de anchura). El corrimiento hacia el rojo de cada quasar se representa radialmente sobre la parte superior del sólido, en una escala que va desde 1,8, en el borde próximo, hasta 3,5, en el borde lejano.

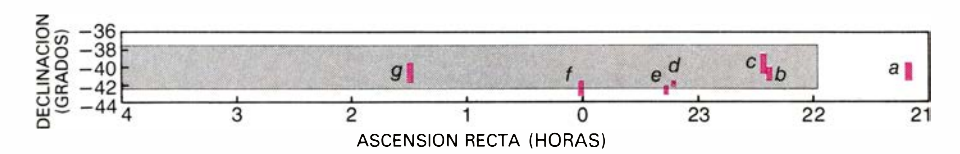
Tal representación nos pone de manifiesto que, en una región entre dos y cuatro horas de ascensión recta, los quasars escasean más que en el resto. Resultaría sorprendente que dicha escasez revelara una falta de uniformidad real de los quasars en esa porción del espacio. Por ello, mis colegas y yo preferimos pensar provisionalmente que la escasez aparente obedece a un efecto de selección en el proceso de exploración. Si uno se fija en la distribución de los quasars a pequeña escala, pueden verse ejemplos de pares y pequeños grupos de quasars situados bastante próximos entre sí. El agrupamiento más prominente aparece claramente cuando se representan de la misma manera tridimensional los quasars de la exploración con el telescopio de cuatro metros [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*]. Un grupo de cuatro quasars con corrimientos hacia el rojo entre 1,83 y 1,86 se arraciman en una región de no más de 200 millones de años-luz de diámetro en la proximidad de cero horas de ascensión recta.

Se trata de unos grupos fascinantes: tienen aproximadamente el mismo tamaño que los supercúmulos de galaxias que se ven aquí y allá en el espacio cercano. Los supercúmulos son regiones de unos 300 millones de años-luz de diámetro que alojan varios cúmulos de galaxias. Constituyen las mayores estructuras conocidas del universo. No se han observado todavía supercúmulos con corrimientos hacia el rojo de hasta un valor de 2. ¿Cabría que el grupo de quasars con corrimientos hacia el rojo alrededor de 1,84 encubriera la posición de un remoto supercúmulo? Tal vez el Telescopio Espacial logre aclarárnoslo.

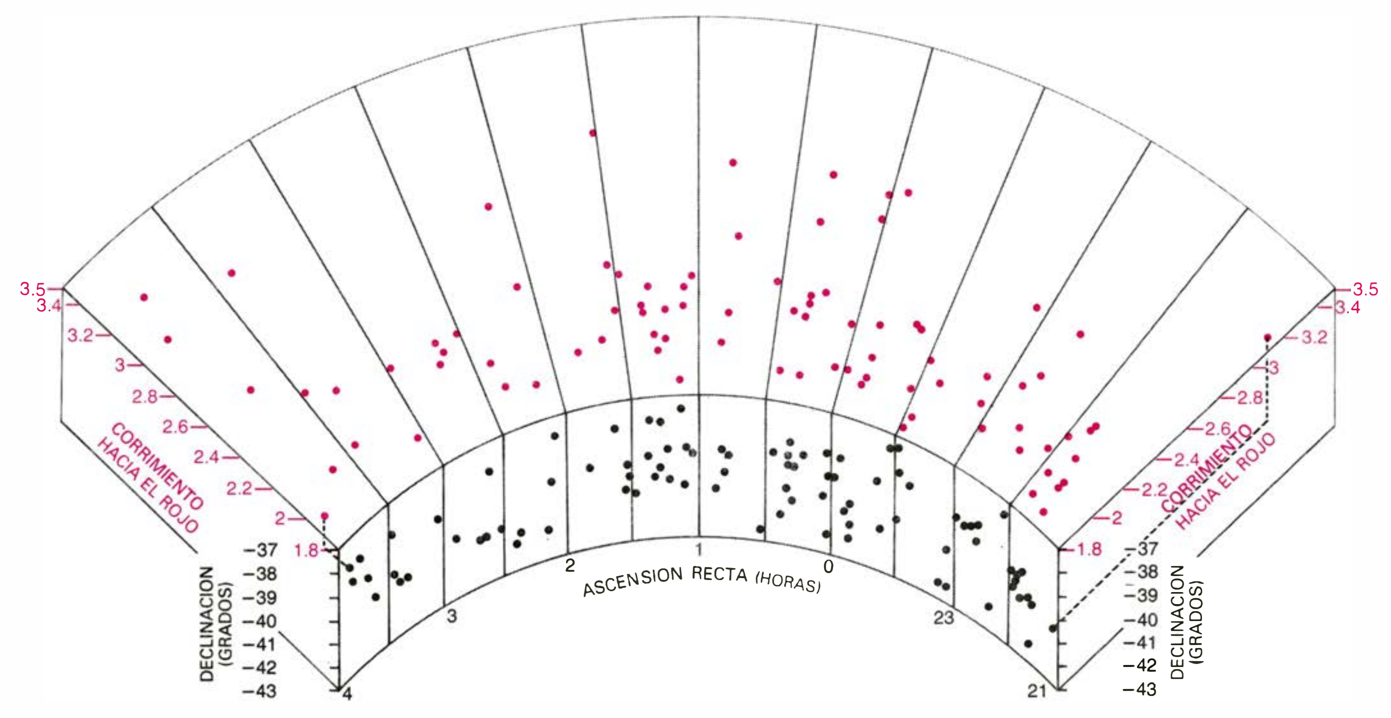
Sin desdeñar la importancia de los



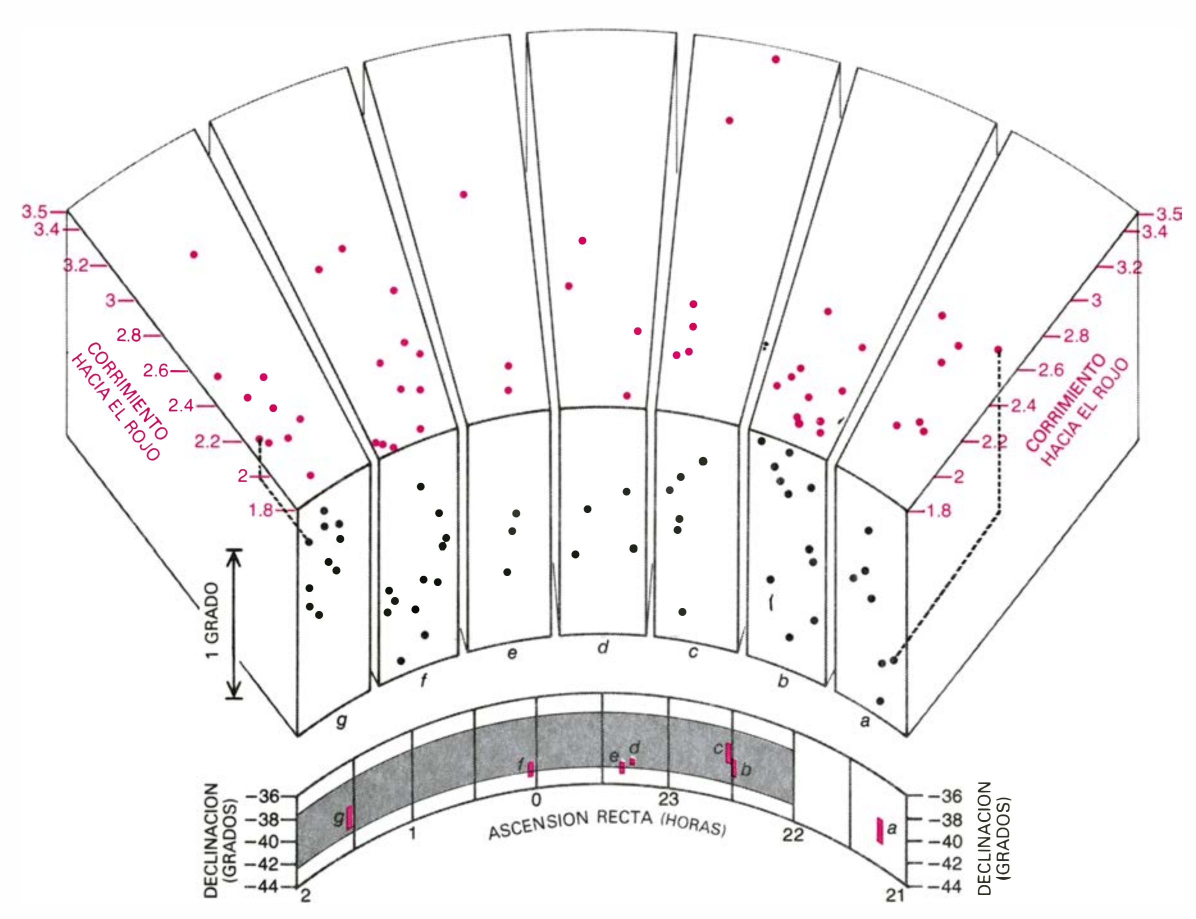
**EL OBJETO MAS DISTANTE HASTA AHORA DESCUBIERTO, sobre la base de su corrimiento hacia el rojo de 3,53, es el quasar OQ 172, que podría confundirse con una estrella vulgar en esta fotografía hecha con el telescopio Schmidt de 1,5 metros del Monte Palomar. OQ 172 fue descubierto en 1972, en el Observatorio de Lick, por E. Joseph Wampler, Lloyd B. Robinson, J. Baldwin y E. Margaret Burbidge.**



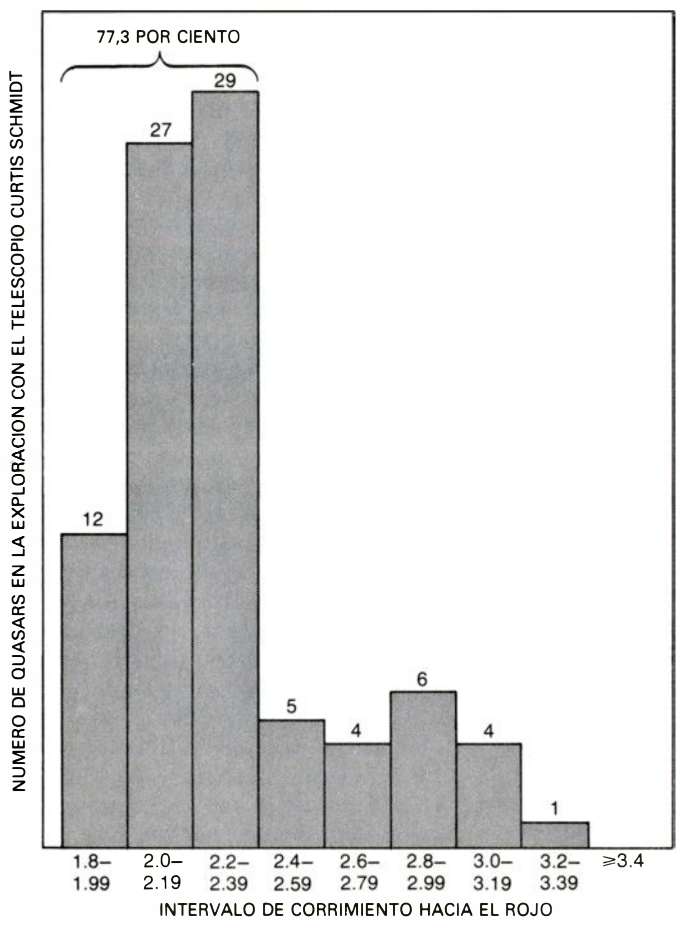

**PARA EVITAR EL POLVO INTERESTELAR, las búsquedas de quasars en Cerro Tololo (Chile) se realizaron lejos del plano de la Vía Láctea: el polvo interestelar reduciría la luz procedente de galaxias y quasars distantes. La banda gris muestra la región de 340 grados cuadrados explorada por Smith con el telescopio de 60 centímetros Curtis Schmidt equipado con un prisma a través de la apertura. Las siete pequeñas zonas en color, que vienen a cubrir un total de 5,1 grados cuadrados, fueron exploradas por Smith y Arthur A. Hoag con el telescopio de cuatro metros. Se hallaba este capacitado para registrar objetos unas cuatro veces más débiles que cualquiera de los detectados por el telescopio Curtis Schmidt.**

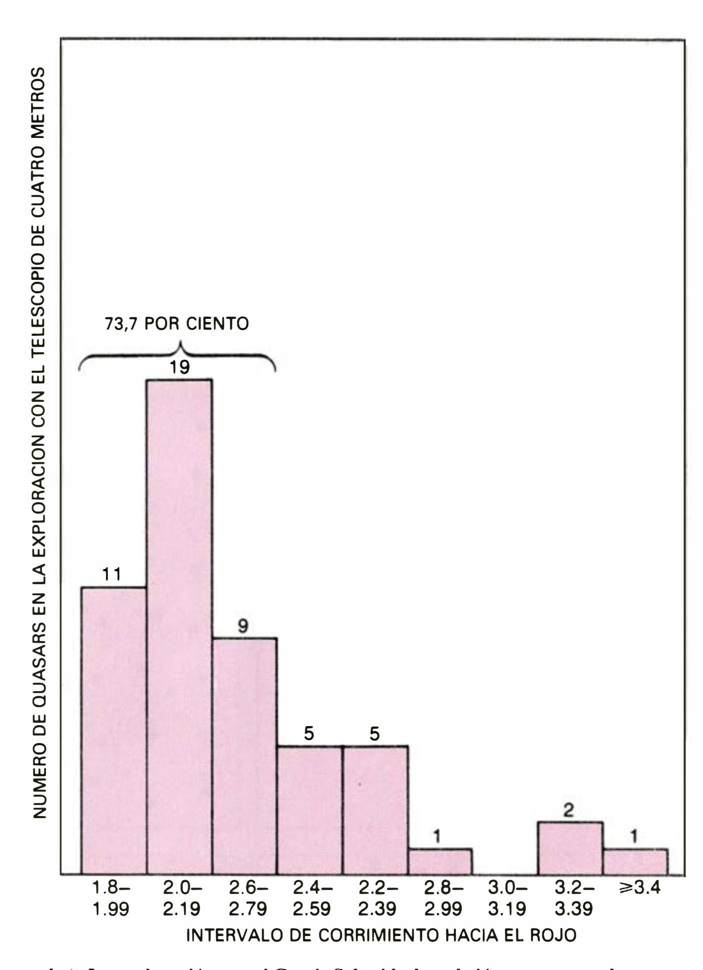


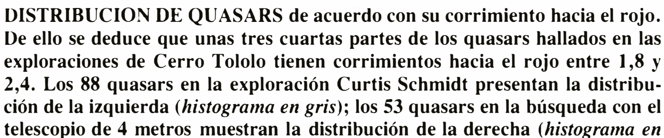

**LA EXPLORACION CON EL CURTIS SCHMIDT** localizó 88 quasars con un corrimiento hacia el rojo superior a 1,8. Los corrimientos hacia el rojo están correlacionados con la distancia; así pues, los 88 objetos pueden inscribirse como si estuvieran distribuidos en un volumen tridimensional de espacio. Los puntos negros de la parte anterior del diagrama muestran la posición de los quasars en el cielo. Los puntos en color, el corrimiento hacia el rojo correspondiente a cada quasar. El esquema de la representación está indicado por las líneas de trazos que unen el quasar más lejano hacia la derecha con su corrimiento hacia el rojo de 3,16 y el quasar más lejano hacia la izquierda con el suyo de 1,96. Se han omitido, por razón de claridad, las otras líneas de unión. La dimensión vertical de la región explorada se ha multiplicado por dos respecto a la horizontal para hacer patente la separación entre quasars.




**EXPLORACION** con el telescopio de cuatro metros; localizó 53 quasars con un corrimiento hacia el rojo superior a 1,8, incluidos los seis que aparecieron en la exploración con el Curtis Schmidt. Aquí, las siete pequeñas zonas exploradas con el telescopio grande se han dilatado arbitrariamente formando cuñas de volumen uniforme. Los puntos negros de las cuñas, sin embargo, conservan la posición correcta de cada quasar dentro de su propia zona de exploración. Se aprecian unas cuantas parejas y pequeños grupos de quasars. En la zona *f*, por ejemplo, hay 4 quasars a una distancia de 12.000 millones de años-luz agrupados cerca del corrimiento hacia el rojo 1,84. Todos ellos caen dentro de un volumen no superior a 200 millones de años-luz de diámetro.



**DISTRIBUCION DE QUASARS de acuerdo con su corrimiento hacia el rojo. De ello se deduce que unas tres cuartas partes de los quasars hallados en las exploraciones de Cerro Tololo tienen corrimientos hacia el rojo entre 1,8 y 2,4. Los 88 quasars en la exploración Curtis Schmidt presentan la distribución de la izquierda (*histograma en gris*); los 53 quasars en la búsqueda con el telescopio de 4 metros muestran la distribución de la derecha (*histograma en color*). La exploración con el Curtis Schmidt descubrió un quasar cada cuatro grados cuadrados de cielo. La exploración con el telescopio de cuatro metros, capaz de detectar objetos más débiles, descubrió, en promedio, ligeramente más de 10 quasars por grado cuadrado de cielo explorado. Aunque los quasars en esta última exploración solían aparecer menos luminosos que los de la Curtis Schmidt, no significaba que fueran en general más distantes.**

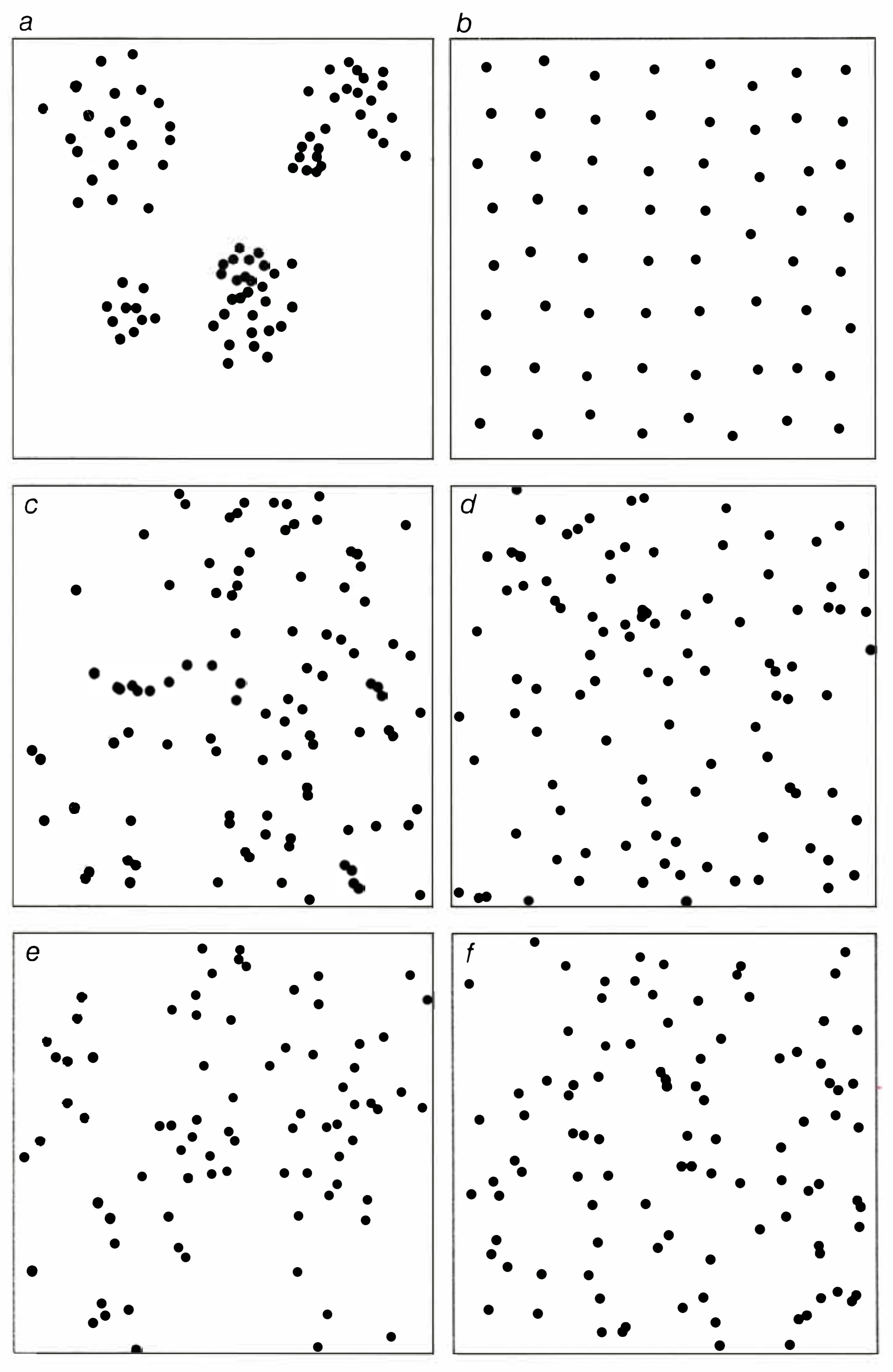
exámenes visuales de los datos, la cuestión de la distribución de los quasars requiere, en último término, un análisis estadístico. ¿Hay una configuración subyacente a la distribución? ¿Son los agrupamientos observados meras fluctuaciones aleatorias? Después de todo, si dejamos caer un puñado de arroz al suelo, algunos granos quedarán más próximos entre sí que el valor medio de la distancia entre todos. En los últimos años se han venido aplicando potentes técnicas estadísticas a las exploraciones de galaxias precisamente para resolver esas dificultades. Con las obligadas modificaciones para los grandes corrimientos hacia el rojo y los efectos de selección del método de exploración, tales técnicas sirven también para el ámbito de los quasars.

Se trata, ante todo, de averiguar si estos objetos presentan desviaciones con respecto a una distribución uniforme y aleatoria. Si se desvían, nos gustaría saber si los quasars se acumulan y qué forma toma la acumulación. Por otro lado, podría encontrarse que los quasars muestren antiacumulación y se encuentren más alejados entre sí de lo que cabría esperar. Tal podría ocurrir en el caso de que la presencia de un quasar en un punto dado inhibiese la formación de otros en su vecindad. La formulación matemática de esas posibilidades y las pruebas para distinguirlas no nos van a preocupar aquí; ello no obsta que las principales posibilidades conduzcan por sí mismas a una representación gráfica bidimensional. La acumulación intensa y la antiacumulación, asimismo intensa, pueden reconocerse a primera vista. Pero cuando una u otra es débil, cuesta distinguir la distribución resultante de otra que sea, en realidad, uniforme y aleatoria [*véase la ilustración de la página siguiente*].

Podemos resumir los resultados, obtenidos hasta ahora en las exploraciones de Cerro Tololo, diciendo que el análisis estadístico concuerda bien con la hipótesis de que los quasars estén distribuidos uniformemente y al azar. Las parejas y grupos que se detectan a simple vista son ni más ni menos que fluctuaciones casuales. Para los aproximadamente 30 quasars con corrimientos hacia el rojo entre 1,8 y 2,2 en la muestra del instrumento de cuatro metros, la distancia media al vecino inmediato es de unos 400 millones de años-luz, lo que queda dentro del intervalo que podría esperarse de una distribución aleatoria. Para los quasars con corrimientos hacia el rojo mayores, en los cuales las distancias medias se miden en miles de millones de años-luz, se puede sacar una conclusión similar. Estos descubrimientos vienen en auxilio de una hipótesis que, si bien suele aceptarse, resulta difícil de confirmar, a saber: a gran escala, el universo es homogéneo. Hipótesis que constituye un punto de arranque crucial para los modelos actuales del universo.

Aunque estos resultados sean tranquilizadores, marcan sólo el primer paso de una investigación que continúa y que habrá de progresar con rapidez a medida que se vayan hallando nuevos quasars. Si la acumulación de galaxias observada se extrapola a la escala y la época cubiertas en la exploración de quasars, puede demostrarse que la acu-

mulación de galaxias no debería ser detectable en las muestras existentes. Será interesante ver si el Telescopio Espacial mejora la sensibilidad de las pruebas de distribución hasta el punto en que se pueda detectar acumulación de galaxias. Se espera que existan cúmulos de galaxias hasta un corrimiento hacia el rojo de 2; y, también, que aparezcan menos resaltados del fondo de materia más densa en aquella época de lo que lo hacen los cúmulos con menores corrimientos hacia el rojo, observados en una época posterior en un universo mucho más expandido y, por ello, menos denso. No hay que dejar de lado las parejas y grupos de quasars, así parecen, hallados en la exploración con el instrumento de cuatro metros. Después de todo, una de las teorías de la formación de las galaxias postula que éstas se originaron gracias a fluctuaciones aleatorias de densidad en el primitivo universo. Los agrupamientos de quasars pueden representar regiones similares donde aumentó la densidad.




**SE ESTA BUSCANDO LA CONFIGURACION DE LA DISTRIBUCION DE QUASARS** porque podría conducir a un mejor conocimiento de la formación de galaxias en el primitivo universo. Las seis configuraciones que recoge la ilustración son analogías bidimensionales de varias posibilidades de distribución. Si los quasars están fuertemente agrupados (*a*) o diseminados en su totalidad (*b*), el hecho tendría que manifestarse abiertamente. Si los quasars sólo presentan débil tendencia a la agrupación (*c*) o al reparto uniforme (*d*), pueden hacer falta pruebas estadísticas a fondo para demostrar que las distribuciones no son uniformes y aleatorias. Dos simulaciones de distribuciones uniformes y caóticas realizadas mediante ordenador (*e*, *f*) muestran que el ojo no puede erigirse en juez fidedigno del grado de aleatoriedad.

Los resultados alcanzados a lo largo de nuestra investigación en Cerro Tololo nos facultan para describir qué aspecto presentaba el universo hace 12 o 15.000 millones de años. Supongamos que nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, se inscribiera dentro del grupo de cuatro quasars que, para nuestros instrumentos, muestran un corrimiento hacia el rojo de 1,85, aproximadamente. Admitiendo que la vida humana pudiera haberse desarrollado en época tan temprana de la historia del universo, ¿qué es lo que veríamos por la noche? En primer lugar, una Vía Láctea mucho más brillante porque tendría una población más prominente de estrellas jóvenes y calientes. Los cuatro quasars del grupo se percibirían con nitidez a simple vista cual brillantes estrellas; la verdad es que los quasars exteriores al grupo en cuestión, y a distancias de hasta 300 millones de años-luz, se divisarían sin auxilio del telescopio. Se habrían descubierto ya los quasars y se les habría clasificado como fenómenos extraños en la primitiva historia de la astronomía. En cuanto hubiera llegado el telescopio, se habría averiguado si son o no el núcleo de las galaxias.

Bueno será recordar que, aun cuando la idea que tenemos de los quasars resulte plausible, hay riesgo todavía de que sea completamente equivocada y bastante probabilidad de que no se ajuste a la realidad de los hechos en varios puntos de importancia. Algunos astrónomos dudan de que los quasars estén tan distantes como sus corrimientos hacia el rojo indican. Otros ponen en duda su alta densidad a grandes corrimientos hacia el rojo y postulan que, o bien los quasars eran entonces más brillantes, o su intensidad ha aumentado en virtud del paso de su radiación por la proximidd de galaxias interpuestas que actúan de lentes gravitatorias. Raramente, por no decir nunca, se recoge un gran volumen de datos que encuentran explicación inmediata en el marco de una inspirada teoría. Lo mismo es probable que suceda con los quasars. El tema quedaría empobrecido sin las actuales hipótesis, aunque parezcan presuntuosas. En todo caso, es difícil imaginar que la idea dominante sobre los quasars se desvanezca sin que tales objetos se rodeen de un nimbo de extrañeza todavía mayor.

# Visión de los colores en los peces

*Los ambientes visuales de los peces son azules, verdes o próximos al infrarrojo. Para seguir la evolución del ojo, constituyen un objeto válido de investigación los pigmentos adquiridos por varias especies en su adaptación a esos ambientes*

Joseph S. Levine y Edward F. MacNichol, Jr.

Las células fotosensibles de la retina constituyen la prolongación más externa del sistema visual de un animal. Captan los fotones de luz visible y los cuentan, desencadenando una compleja serie de acontecimientos químicos y neurales que pueden dar por resultado la sensación visual. En muchos animales, esa función de recolección de datos de las células ha evolucionado para sacar partido de las diferencias cromáticas e intensidad luminosa; en no pocos ambientes, la visión de los colores constituye un método eficaz para obtener información precisa, esencial para la supervivencia. Pero en las profundidades subacuáticas el número de fotones que bañan a un organismo se halla muy reducido y el color de la luz ambiente está confinado en una estrecha banda espectral. En consecuencia, el sistema de células fotorreceptoras de la retina de un organismo de aguas profundas ha evolucionado para maximizar la sensibilidad a la luz disponible, en lugar de hacerlo para la discriminación del color. Entre la oscuridad de las profundidades y la luz brillante de la superficie media una gama continua de ambientes luminosos que varían en color e intensidad. Ese laboratorio natural nos ofrece múltiples sistemas visuales.

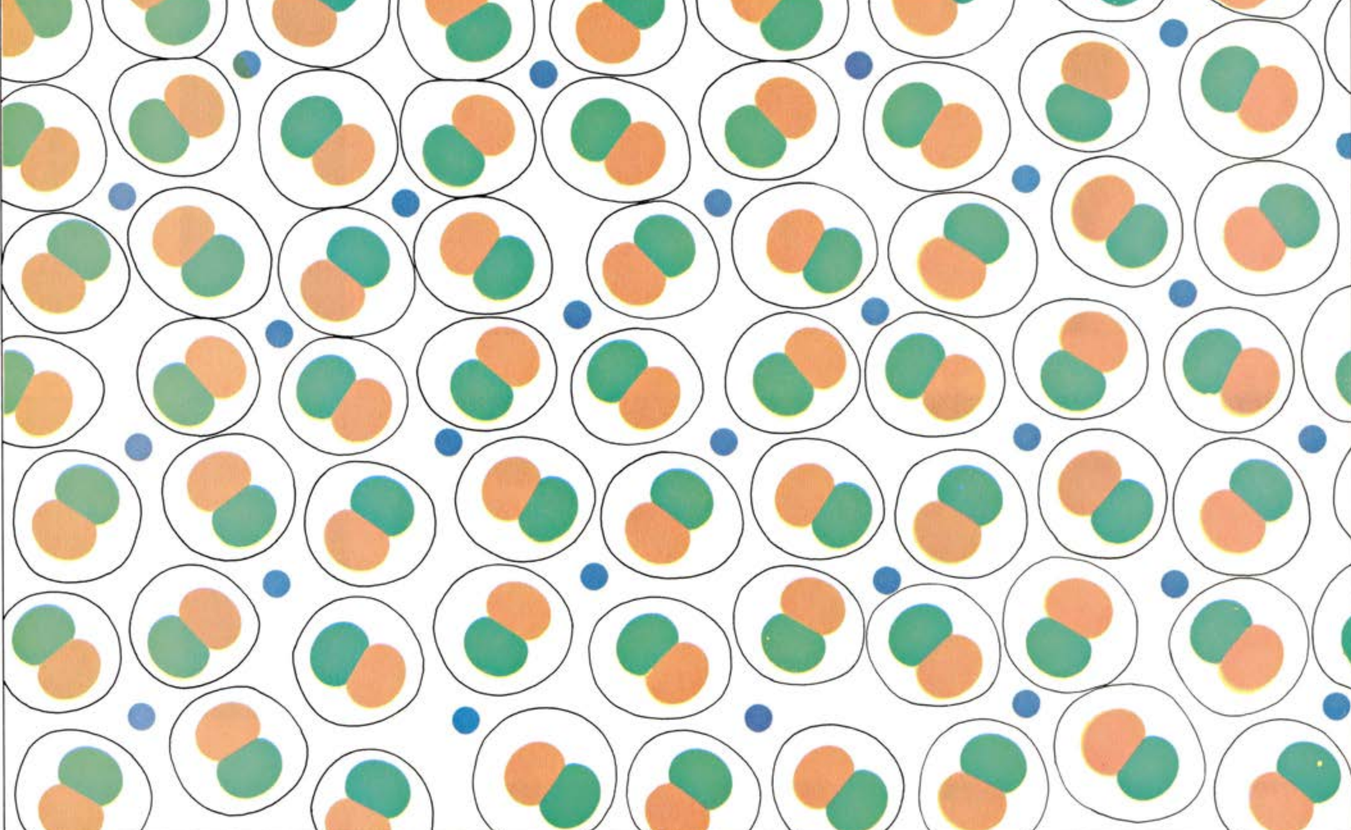
Años atrás abordamos en firme el estudio de los fotorreceptores de los teleósteos (peces óseos, por contraposición a los cartilaginosos, como los tiburones), con la esperanza de comprender algún día cómo podían haberse desarrollado los sistemas visuales complejos a partir de sus precursores. La reconstrucción evolutiva del sistema visual no podía basarse en pruebas fósiles, porque los tejidos blandos del ojo y los trayectos nerviosos no se conservan. Decidimos, por tanto, investigar a representantes de varias familias de teleósteos con la idea de estudiar algunas de las relaciones que guardan entre sí los sistemas visuales, el comportamiento dependiente de la visión y el ambiente. Dado que las relaciones evolutivas entre las especies de teleósteos actuales se conocen a partir de bases independientes, el examen de su sistema y de su ecología visuales podía conducirnos hasta la reconstrucción de los estadios probables que siguió la evolución de la visión.

Podría suponerse que una tal reconstrucción resultaría bastante sencilla. Dar por sentado, por ejemplo, que los peces de los que el registro fósil revela escasa variación evolutiva en épocas recientes retendrían sistemas visuales bastante primitivos; y, en línea con lo anterior, presumir que las especies que han evolucionado en épocas recientes hayan incorporado sistemas visuales más avanzados que los que se encuentran en las especies más antiguas. Pero ninguna de las dos últimas suposiciones tiene en cuenta la posibilidad de que los ojos se hayan desarrollado independientemente de otros órganos; los ojos pueden conferir ventajas selectivas en determinadas actividades vitales: búsqueda de alimento, evitación de los depredadores y elección de la pareja. Las ventajas selectivas de un sistema visual sobre otro, en cierto ambiente y para un repertorio de comportamiento definido, pueden producir cambios en los ojos de un pez que, en otros aspectos, no se vea transformado por fuerzas evolutivas. Los teleósteos ilustran estas posibilidades evolutivas con particular claridad.

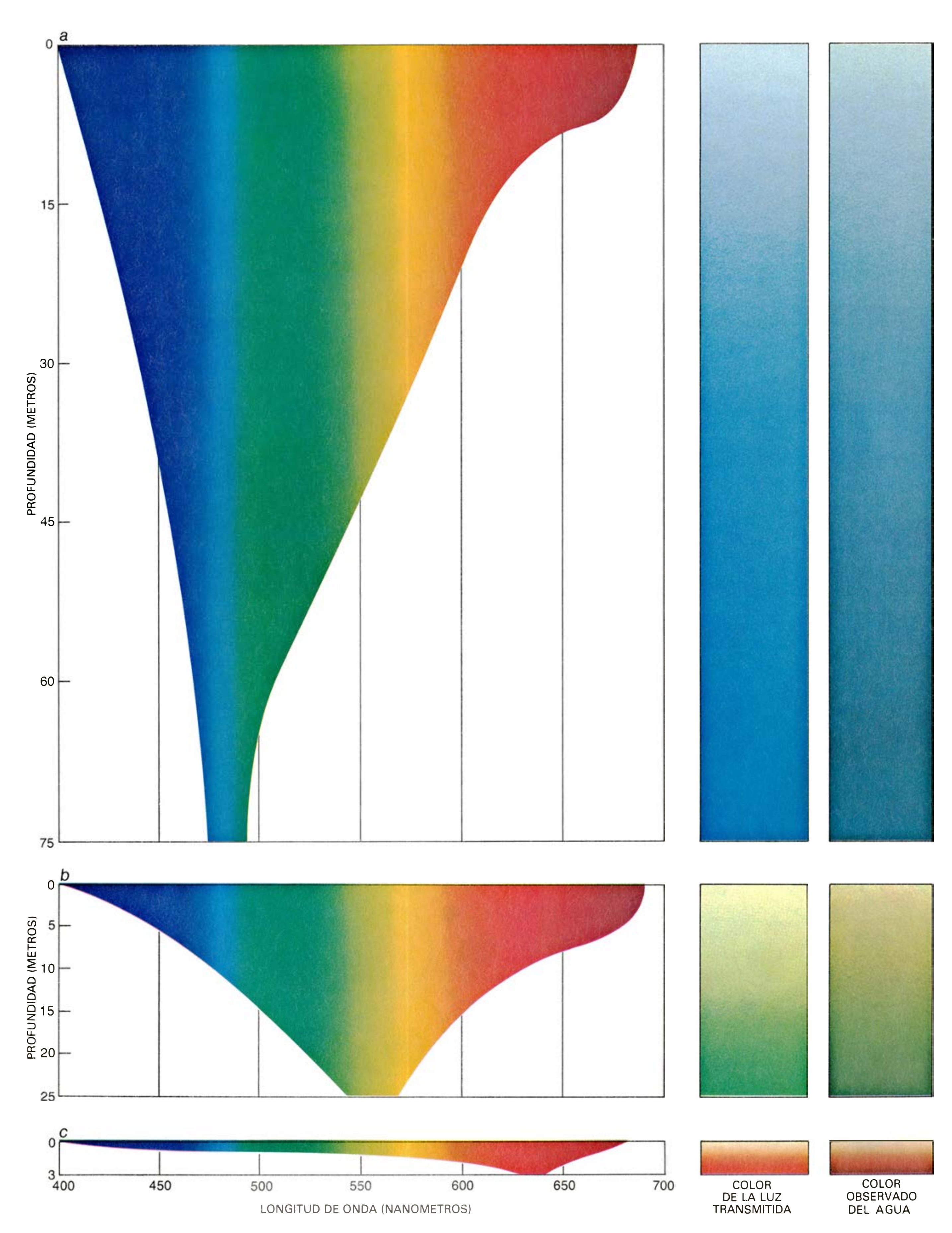
Una radiación evolutiva de carácter explosivo ha situado del orden de 17.000 a 30.000 especies de teleósteos en un amplio espectro de hábitats acuáticos. Hay familias que ostentan una amplia gama de tipos de comportamiento dependientes de la visión, ocupan hábitats que se extienden por casi todas las zonas fóticas del mar y los lagos de agua dulce. Sus ojos pueden diferir de manera tan espectacular en tamaño, forma, organización retiniana y sensibilidad al color que nunca se sospecharía, si sólo se atendiera al examen de los ojos, que las especies se hallan estrechamente emparentadas. Por el contrario, especies no emparentadas que viven en la misma zona fótica pueden presentar notables similaridades en sus sistemas visuales. Por cuya razón, los sistemas primitivos que puedan haber conservado los teleósteos modernos no pueden distinguirse de manera inequívoca de los sistemas degenerados o especializados.

A pesar de esta dificultad, el estudio ecológico comparado puede dar respuesta a determinadas preguntas de interés relacionadas con la evolución. ¿Qué combinación de ventajas selectivas y de limitaciones operativas favorece la posesión de sistemas visuales capaces de discriminar dentro de una amplia gama de colores y de intensidades luminosas? ¿Bajo qué circunstancias la posesión de un sistema complejo de este tipo es más un estorbo que una ventaja? Aunque se sabe relativamente poco acerca de las limitaciones de la visión que se hallan específicamente relacionadas con el comportamiento alimentario, el de huida o la conducta reproductora, se ha averiguado mucho sobre las condiciones de iluminación que existen bajo el agua.

La radiación solar que llega a la superficie del agua está compuesta por fotones de todas las longitudes de onda visibles, junto con fotones de las regiones infrarroja y ultravioleta del espectro electromagnético. Las energías de los fotones de luz visible corresponden a colores (o longitudes de onda) que van desde el violeta, con una longitud de onda de 400 nanómetros, hasta el rojo oscuro, con una longitud de onda de 700 nanómetros. Cuando la luz atraviesa el agua, su intensidad disminuye; pérdida de intensidad que varía con el color. Las masas de agua dulce y



**CELULAS FOTORRECEPTORAS de la retina del tetra negro (*Gymnocorymbus ternetzi*), que forman un mosaico regular. En la fotomicrografía de arriba se muestran los conos, normalmente esenciales para la visión de los colores, tal como aparecen desde la parte posterior de la retina del pez, aumentados 1000 diámetros. (Para mayor claridad se han extraído de la preparación la mayoría de los bastones, más sensibles a la luz que los conos.) En la retina del tetra negro hay tres tipos de conos: conos aislados que poseen un pigmento visual sensible al azul, y conos dobles, formados por células separadas, que poseen un pigmento sensible al verde y otro sensible al anaranjado. En el dibujo de abajo se asocia el color de la luz que más absorbe cada pigmento con su posición en la retina. La fotomicrografía fue realizada por los autores. El color de las células de la fotomicrografía es un artefacto técnico.**




**TRANSMISION DE LA LUZ** en el agua, que depende del color o longitud de onda de la luz. En océanos y lagos claros (*a*), la luz se hace cada vez más monocromática y más azul conforme aumenta la longitud de su recorrido. En agua dulce con materia orgánica verde (*b*), la luz de todas las longitudes de onda se absorbe más deprisa que en aguas cristalinas, pero la luz se hace más verde con la longitud del recorrido. En ríos, pantanos y marismas que portan gran cantidad de productos de descomposición de vegetales y animales (*c*), la absorción es rápida y la distribución espectral de la luz se desplaza hacia el rojo. Se dice que estas aguas son negras, porque el ojo humano es relativamente insensible a la luz de longitudes de onda largas; un nombre menos antropomórfico sería el de agua infrarroja. Las profundidades que se indican para la máxima penetración de la luz son típicas, pero varían ampliamente.

agua salada que no contienen mucha materia orgánica absorben mucho más la luz violeta y roja que luz de longitudes de onda intermedias. De ahí que los océanos tropicales y los lagos cristalinos, como el lago Crater, de Oregón, y el lago Malawi, del Africa oriental, se tornen más azules con la profundidad, al tiempo que se absorben los colores no azules. En estas aguas, la luz azul puede penetrar a una profundidad de más de 75 metros, mientras que la luz roja y la violeta faltan prácticamente por debajo de una profundidad de unos 25 metros.

A diferencia de estos hábitats de "aguas claras", la mayoría de los lagos, ríos y aguas costeras de la zona templada contienen fitoplancton verde amarillento y materia orgánica disuelta procedente de la descomposición de animales y plantas. En estas aguas, la luz de todas las longitudes de onda se absorbe con mayor intensidad que en el agua clara; las intensidades relativas de color a cada profundidad difieren bastante de las que se encuentran en aguas cristalinas. La luz de onda corta, violeta y azul, es la más absorbida, y la luz verde o verde-amarilla, de longitudes de onda entre 540 y 560 nanómetros, adquiere un predominio mayor con la profundidad. Para el ojo humano, el agua es verde.

En marismas, pantanos y ríos de "agua negra" hallamos los mismos compuestos, absorbedores de radiación de onda corta, que en lagos y ríos, además de taninos, ligninas y otros productos procedentes de una descomposición más completa de los vegetales. Los efectos combinados de la materia en suspensión y la disuelta pueden ser la absorción de toda la luz ya a unos tres metros de la superficie; la longitud de onda que se transmite más corresponde a los 600 nanómetros o mayor; al ojo humano, el agua de estas características le suele parecer de color pardo oscuro o pardorrojizo.

Las partículas suspendidas y las propias moléculas de agua dispersan la luz en todas direcciones. Cuando la luz se dispersa, debe realizar un trayecto más largo por el agua para alcanzar un punto dado; además, y debido a la dispersión, cada visual en el agua es una fuente de fotones, de modo que el agua misma aparece coloreada en todas direcciones. Coloración que se denomina luz espacial de fondo; los efectos combinados de la dispersión y la absorción hacen que varíe con la dirección de la visual.

Aunque los escafandristas conocían, desde tiempo atrás, la luz espacial de fondo, hubo que esperar hasta mediados de la década de 1970 para tomar la primeras mediciones espectrorradiométricas de ella en hábitats marinos tropicales. William N. McFarland, de la Universidad de Cornell, y Frederick W. Munz, de la de Oregón, confirmaron cuantitativamente observaciones anteriores que sugerían que la luz era mucho más monocromática a lo largo de visuales horizontales que a lo largo de una visual vertical cercana a la superficie. McFarland y Munz señalaron que su hallazgo constituía un hito importante en la evolución de los sistemas visuales acuáticos. A diferencia de los animales terrestres, que han de distinguir el alimento, los depredadores y la pareja frente a cualquier cosa que se encuentre contra el fondo en el momento de la visualización, los peces deben normalmente detectar objetos contra una luz espacial de fondo cuyo color es relativamente constante a lo largo de cualquier visual.

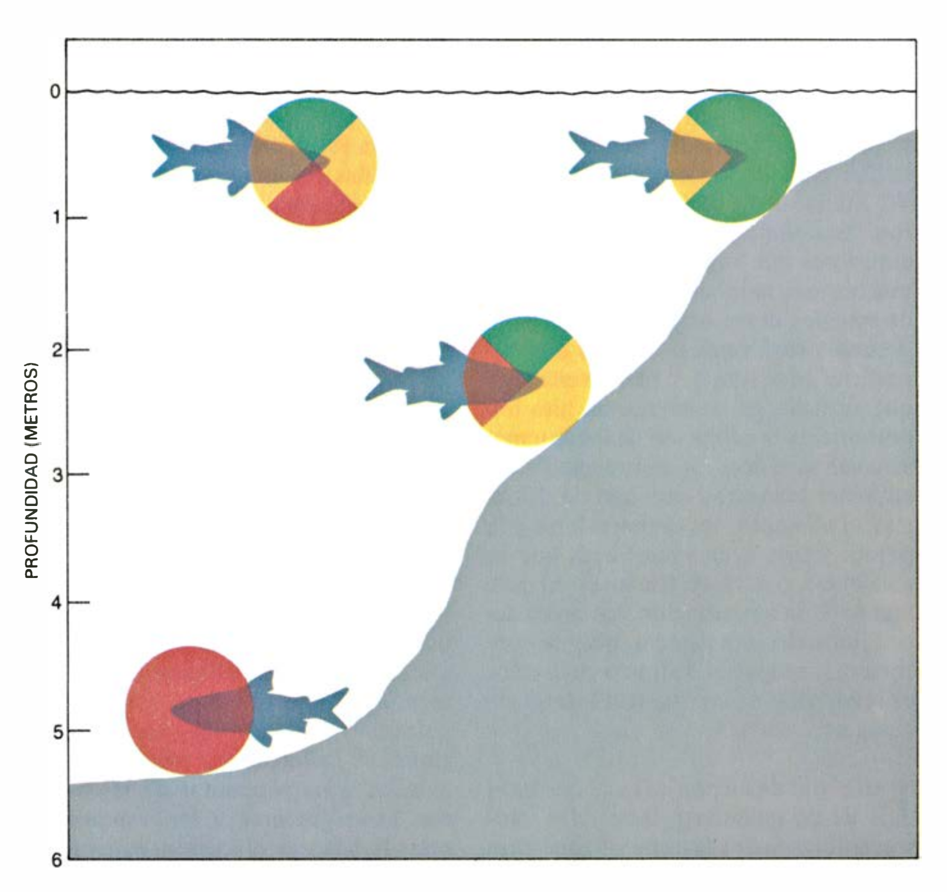
En el ojo de un pez, al igual que en el de un mamífero, las células fotorreceptoras sobre las que se concentra la luz incidente están llenas de ciertas sustancias fotosensibles llamadas pigmentos visuales. Los pigmentos visuales fueron descubiertos independientemente, en 1877, por los fisiólogos alemanes Franz Boll y Wilhelm Friedrich Kühne. Boll observó que, al extraer la retina de una rana, ésta presentaba inicialmente un color rojo vivo, pero se blanqueaba a la luz, volviéndose primero amarilla y luego incolora. Kühne encontró poco después que el pigmento de los bastones (las células fotorreceptoras en forma de bastoncillos) de muchos animales era asimismo rojo y se decoloraba si se le exponía a la luz. En un animal vivo, el color del pigmento se restituye cuando colocamos al animal en la oscuridad, pero en las células extirpadas, la decoloración del pigmento es permanente.

Los pigmentos visuales captan los fotones luminosos absorbiéndolos, al igual que hace el agua. Por tanto, para apreciar la importancia de los pigmentos es necesario considerar las longitudes de onda que se absorben de manera máxima y no las que más se transmiten. En el hombre, por ejemplo, el pigmento de las células denominadas bastones es de color rosa, de ahí el nombre de rodopsina, cuyas raíces griegas significan "rosa" y "visión", respectivamente. La rodopsina aparece rosa porque transmite la luz roja y la azul, mientras que su máximo de absorción se encuentra a una longitud de onda de 500 nanómetros, en la región verde azulada del espectro.

Cuando un pigmento visual absorbe fotones, las moléculas de éste experimentan cambios estructurales y desencadenan respuestas electroquímicas en las células fotorreceptoras que contienen el pigmento. La respuesta de cada célula viene determinada, en parte, por el número de fotones absorbidos por el pigmento, pero no por las longitudes de onda de los fotones; después de absorberse un fotón, su longitud de onda ya no afecta a la respuesta de la célula fotorreceptora. La única manera que tiene el sistema visual de extraer información acerca del color de la luz incidente es tomar en consideración la probabilidad estadística de que uno de sus pigmentos absorba un fotón de una determinada longitud de onda.

¿Cómo pueden determinarse estas probabilidades de absorción? Los primeros investigadores extraían los pigmentos del ojo completo por métodos químicos, de modo que sus investigaciones se hallaban casi enteramente limitadas a los pigmentos de los bastones. Los pigmentos de los bastones son más abundantes y fáciles de extraer que los de los conos (las células fotorreceptoras en forma de cono que se encuentran en muchas retinas). Una vez extraído un pigmento de los bastones, se analizaba su espectro mediante un espectrofotómetro. En este instrumento, un haz de luz monocromática de determinada longitud de onda visible se hacía pasar a través del pigmento, y se medía la intensidad de la luz transmitida. La intensidad medida se comparaba con la intensidad de un haz de referencia del mismo origen, que no pasaba a través del pigmento. Cabe transformar matemáticamente los datos en un gráfico que indique la densidad óptica de los pigmentos en función de la longitud de onda; este gráfico se denomina espectro de absorbancia. También puede calcularse, a partir del espectro de absorbancia del pigmento, la probabilidad de que un pigmento visual absorba un fotón de una determinada longitud de onda.

El método que nosotros empleamos para determinar los espectros de absorbancia de los pigmentos visuales coincide en su diseño con el descrito más arriba, aunque con una salvedad: podemos registrar los espectros de los pigmentos pertenecientes a células fotorreceptoras individuales. El instrumento que utilizamos fue el microespectrofotómetro, aparato que lleva incorporado un microscopio de alta resolución, y permite así analizar espectralmente una zona aumentada de la preparación. No más de una docena de la-




**DISPERSION DE LA LUZ por las moléculas de agua y las partículas suspendidas en la misma; determina que el color dominante de la luz transmitida varíe con la dirección de la visual. Dado que cada punto de cada visual es una fuente de fotones, el agua misma parece tener colores distintos en las diferentes direcciones. La coloración impone un fondo de luz espacial contra el que han de verse todos los objetos, e interpone asimismo una luminosidad veladora entre el observador y el objeto. La ilustración muestra cómo varía la coloración con la dirección en cuatro microhábitats de un río de "agua negra": en la superficie y en el fondo, en aguas someras y profundas. Los dibujos del artículo son de G. V. Kelvin.**

boratorios en todo el mundo dispone de este tipo de instrumentos. Las primeras versiones del microespectrofotómetro de nuestro laboratorio fueron desarrolladas por William B. Marks, de la Universidad Johns Hopkins, y por uno de nosotros (MacNichol) a principios de la década de 1960, y por Ferenc I. Hárosi, del National Institute of Neurological Diseases and Stroke, en los primeros años de la década de 1970. El instrumento permite examinar la distribución de las células en la retina, además de los distintos pigmentos en diferentes tipos de células fotorreceptoras.

¿Cómo se prepara una muestra retiniana para microespectrofotometría? Se separa, del epitelio pigmentario, la fina capa de células fotorreceptoras. (El epitelio pigmentario es una capa de tejido retiniano, situada detrás de las células, que absorbe la luz dispersa en el ojo.) Ello se consigue sumergiendo primero la retina en una solución salina y luego separando quirúrgicamente las capas. La capa de células fotorreceptoras se monta sobre un cristal cubreobjetos, muy fino, y se coloca un segundo cubreobjetos sobre las células, de suerte que éstas queden aplastadas sobre el primer cristal. La operación debe hacerse enteramente a oscuras, o bajo iluminación infrarroja, pues de otro modo los pigmentos de la preparación se decolorarían, perdiendo su utilidad para la obtención de datos espectrales. Por ello, con el fin de situar el cubreobjetos y de enfocar la imagen de la preparación para su exploración mediante el microespectrofotómetro, utilizamos iluminación infrarroja a una longitud de onda que no absorbe apreciablemente ningún pigmento visual. Observamos la preparación en un monitor de televisión conectado a una cámara de televisión sensible al infrarrojo, que recibe una imagen de la muestra aumentada 1000 diámetros.

Una vez se ha conseguido alinear una célula fotorreceptora con el trayecto del haz explorador del microespectrofotómetro, el registro del espectro de absorbancia es prácticamente automático. Se hace pasar un haz de luz monocromática de baja intensidad a través del aparato, primero sin la célula de la preparación y luego con esta célula donde le corresponde. Las intensidades de los dos haces transmitidos de cada longitud de onda se registran en un pequeño ordenador, que las compara. Trabajando con haces de baja intensidad y barriendo rápidamente y de manera repetida el espectro evitamos tener que compensar la decoloración del pigmento siempre que la luz atraviesa una célula de la preparación.

Casi todos los pigmentos visuales absorben, en cierto grado, luz de todas las longitudes de onda visibles. Sin embargo, cada pigmento tiene una longitud de onda bien definida para la cual la probabilidad de absorción es máxima; las probabilidades decrecen muy rápidamente para longitudes de onda mayores y menores que aquélla. Un pez de aguas profundas con sólo un pigmento visual tendría la mayor sensibilidad visual posible si la máxima probabilidad de absorción del pigmento correspondiera al color de la luz espacial de fondo. Uno de los primeros éxitos de la ecología visual fue establecer el carácter frecuente de tales correspondencias en los peces marinos no migradores de aguas profundas. La luz que hallan los peces que bajan a más de 100 metros de profundidad es a la vez mortecina y azul, de longitudes de onda comprendidas entre los 470 y los 490 nanómetros. Las longitudes de onda de máxima absorción de los pigmentos de los bastones se ajustan perfectamente a la distribución espectral de la luz ambiental.

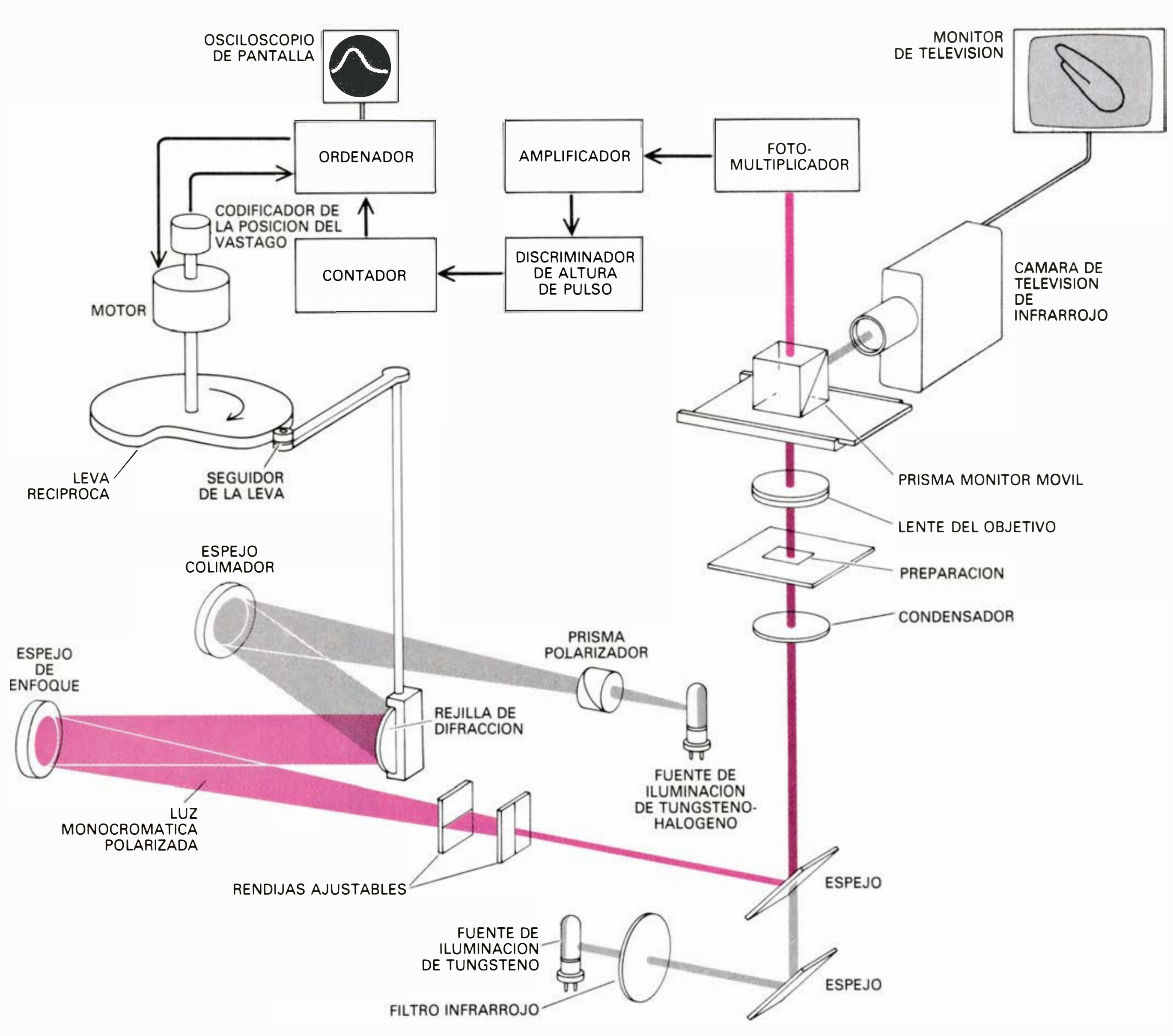
Sin embargo, los pigmentos de los bastones de las especies marinas costeras y de las dulceacuícolas no siguen la distribución espectral de la luz disponible con tanta regularidad como los de las especies de aguas profundas. Los bastones de los peces de la zona templada cuyo hábitat es agua salada somera se muestran más sensibles a la luz verde azulada de longitudes de onda entre 500 y 510 nanómetros, aunque la luz espacial local sea verde-amarilla, de longitudes de onda entre 525 y 550 nanómetros. Los pigmentos de los bastones de los peces de agua dulce, tanto de hábitats profundos como de profundidad media, parecen hallarse limitados a una probabilidad de absorción máxima a longitudes de onda no superiores a los 540 nanómetros, aunque la luz espacial de su ambiente está dominada por luz anaranjada rojiza de 600 nanómetros.

En 1966, J. N. Lythgoe, de la Universidad de Sussex, sugirió que los pigmentos aparentemente desajustados se apartaban del color de la luz espacial

con el fin de maximizar el contraste visual. Lythgoe señalaba que cuando un pigmento corresponde a la luz espacial, existe un contraste relativamente elevado entre un objeto oscuro, que deposita relativamente pocos fotones sobre el pigmento visual, y la luz espacial, que deposita muchos fotones. Sin embargo, un objeto claro depositará muchos fotones sobre el pigmento sea cual fuere su color, de modo que no se le distinguirá con nitidez de la luz espacial de fondo. Por el contrario, si la luz que ilumina el objeto es espectralmente amplia y el pigmento no corresponde a la luz espacial, la situación se invertirá. Tanto un objeto oscuro como la luz espacial aparecerán oscuros; costará, pues, llegar a distinguirlos. Pero un objeto claro aparecerá iluminado, y se le distinguirá fácilmente de la luz espacial [*véase la ilustración de la página 93*].

Los bastones están especialmente adaptados a la iluminación de baja intensidad. Sabemos, además, que una especie considerada suele contener sólo un tipo de pigmento. La visión que se base en los bastones responderá, pues, a variaciones en la intensidad de la luz. A un pez que únicamente posea bastones (un monocromático de bastones) el mundo le parece fotografiado sobre película en blanco y negro a través de un filtro de color. No tiene forma de distinguir entre objetos de color azul oscuro y otros de color rojo oscuro o verde oscuro; confunde fácilmente los colores claros con el blanco.

No obstante, un monocromático puede acomodar su comportamiento para sacar el máximo partido del contraste entre la luz espacial y los objetos relativamente oscuros. Por ejemplo, el listado, un túnido (*Katsuwonus pelamis*), posee tan sólo un pigmento visual, aun cuando está dotado de conos y bastones. Munz y McFarland señalaron que el listado maniobra de modo que pueda abalanzarse sobre su presa




**MICROESPECTROFOTOMETRO que determina el espectro de absorbancia para el pigmento visual de una única célula fotorreceptora. El aparato mide la relación entre la intensidad de un haz de luz monocromática que pasa a través del pigmento y la intensidad de un haz idéntico que no atraviesa el pigmento. En el diagrama esquemático, el haz se polariza y luego una rejilla de difracción lo divide en sus componentes espectrales. La longitud de onda del haz monocromático se calibra con respecto a la posición de un árbol de levas que controla la rejilla. De ahí que puedan registrarse simultáneamente en un ordenador la longitud de onda precisa del haz de entrada y la intensidad del de salida. Los pigmentos se decoloran y pierden su capacidad de absorber luz si se exponen a luz intensa. Por ello, los haces que pasan a través de las preparaciones se mantienen a baja intensidad, y los fotones del haz se convierten en pulsos eléctricos mediante un fotomultiplicador. Los pulsos se amplifican, se separan de las señales aleatorias espúreas y se contabilizan en un contador, cuya salida se lee periódicamente en un ordenador. Para colocar en posición y enfocar las preparaciones deberá emplearse luz infrarroja.**

desde abajo. Vista desde abajo, la silueta de la presa aparece recortada contra la luz espacial vertical, y el listado, en el que la sensibilidad de su pigmento único corresponde a la luz espacial, puede explotar el contraste entre su presa, relativamente oscura, y la luz espacial, relativamente brillante.

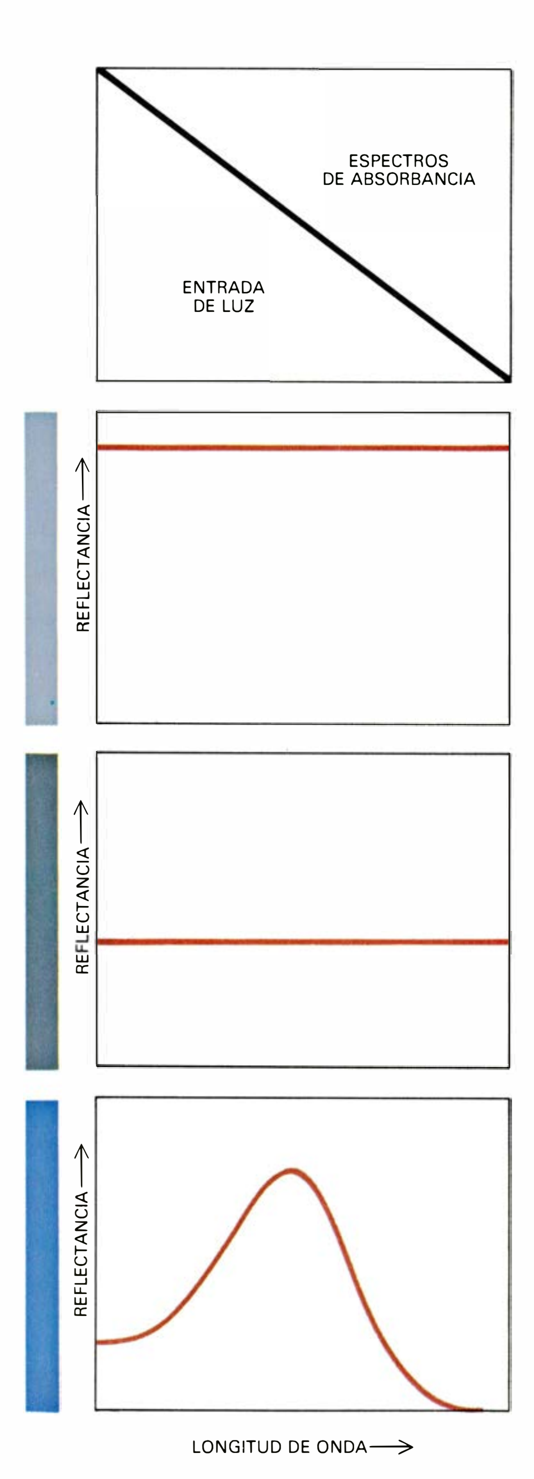
Pero hay muchos peces con dos o tres clases de conos, además de sus bastones. Cada clase de conos se halla por lo general asociada con un pigmento visual determinado; las mediciones microespectrofotométricas han mostrado que los pigmentos de los bastones y los de los conos vienen a tener la misma probabilidad de absorber fotones. Debido a las diferencias entre bastones y conos y a la naturaleza de sus interacciones con otras células de la retina, para activar la visión en los conos se requiere, empero, luz mucho más intensa que la que se precisa para activar la visión en los bastones. Los conos suelen ir asociados con la visión de los colores; la discriminación cromática otorga una clara ventaja evolutiva en hábitats donde la luz brilla y está compuesta de muchos colores. Pero no pensemos que los conos, uno a uno, se hallan más capacitados que los bastones para distinguir los colores: su respuesta depende también del número de fotones absorbidos por sus pigmentos, pero no de las longitudes de onda de los fotones. Aun cuando haya varios tipos de pigmentos entre las células fotorreceptoras de la retina, se requiere un "conexionado" neural adicional para que puedan efectuarse discriminaciones fundadas en el color. Cabe, pues, que las ventajas evolutivas que en un comienzo supusieron los conos no guardaran una relación directa con la visión cromática. Las ventajas de los conos derivaban seguramente de su mejor adaptación a la luz brillante y del hecho de que un sistema visual de pigmentos múltiples permite el contraste visual a lo largo de una banda espectral más amplia que en el caso de un sistema con un solo pigmento.

Algunos peces de agua salada que viven cerca de la superficie, como la llampuga (*Coryphaena hippurus*), tienen dos pigmentos diferentes en los conos, uno que absorbe sobre todo en el verde y otro que absorbe especialmente en el azul. Un sistema visual dicromático de este tipo es sensible a la luz a través de una más amplia banda espectral que un sistema monocromático, por la sencilla razón de que hay más pigmentos que produzcan una absorción eficiente en más regiones del espectro. Cuando un dicromático de agua salada mira hacia arriba, el pigmento verde corresponde bien a la luz espacial, mientras que cuando mira hacia delante o hacia abajo, el pigmento azul es el que mejor casa.

No obstante, McFarland y Munz han sostenido que, desde un punto de vista evolutivo, la principal ventaja de los sistemas visuales de dos pigmentos frente a los de un solo pigmento es que aquéllos permiten resaltar, contra la luz espacial de fondo, los objetos claros y los oscuros. Cuando un pez dicromático sensible al azul y al verde mira hacia arriba, el pigmento que absorbe el verde le permite distinguir objetos oscuros contra la luz espacial predominantemente verde; el pigmento que absorbe el azul le permite diferenciar los objetos claros. Cuando el pez mira hacia delante o hacia abajo, la función de los dos pigmentos se invierte, pero el efecto neto sigue siendo que tanto los objetos claros como los oscuros se destacan del fondo.

Nuestros datos demuestran que los pigmentos de los conos de los peces teleósteos se corresponden bastante bien con la iluminación de que se dispone en el ambiente local del pez. El espectro más amplio de pigmentos visuales se encuentra entre las especies que son activas cerca de la superficie, donde reina una luz brillante y de amplio espectro. En agua salada, a profundidades intermedias, la luz roja, de longitud de onda larga, procedente de la superficie se ha absorbido casi por entero; a tales profundidades la mayoría de especies de agua salada carecen de pigmentos que absorban la luz roja. Sus conos son sensibles de manera máxima a la luz azul y verde.

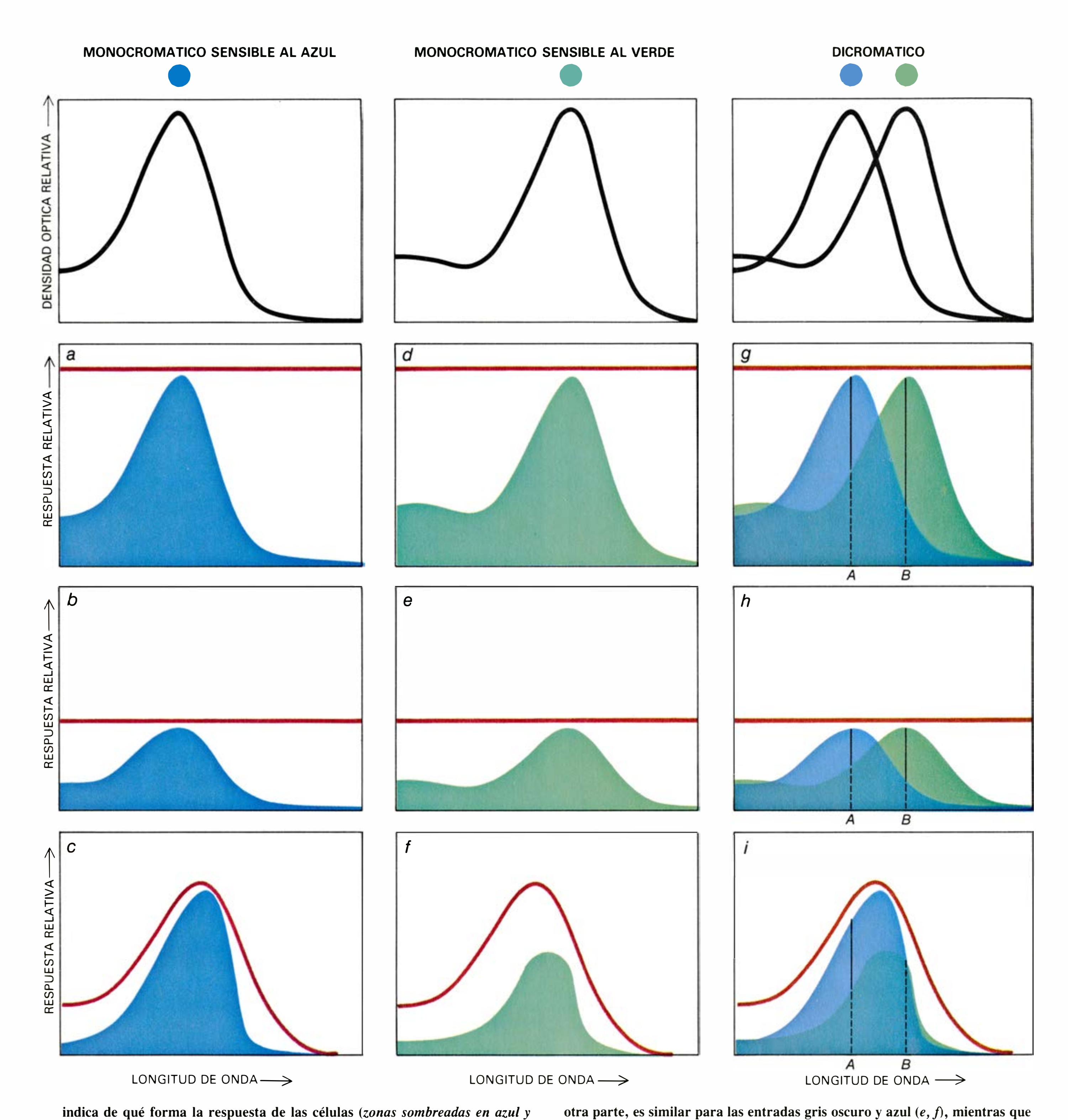
Constituye excepción a esta tendencia el cótido *Hemitripterus americanus*, que estudiamos junto con Hárosi y Barbara-Ann Collins, del Marine Biological Laboratory de Woods Hole, Massachusetts. Estos peces, llamados cuervos marinos, poseen tres pigmentos, de sensibilidad máxima a la luz azul, verde y verde-amarilla, que cubren un abanico espectral mucho más amplio de lo que se esperaría de un pez que pasa la mayor parte de su vida a profundidades superiores a los 100 metros. Sin embargo, para comprender la utilidad adaptativa del sistema visual de un pez debe considerarse todo el repertorio de comportamiento del animal. En la estación reproductora, a finales de otoño, el cuervo marino se desplaza hacia aguas someras y, con ello, a una luz espectralmente más amplia. El cuerpo de los individuos reproductores se vuelve de color amarillo, naranja y escarlata vivos; tras la fecundación, los huevos se depositan sobre una especie de esponja de color anaranjado o amarillo brillante. Este comportamiento requiere discri-



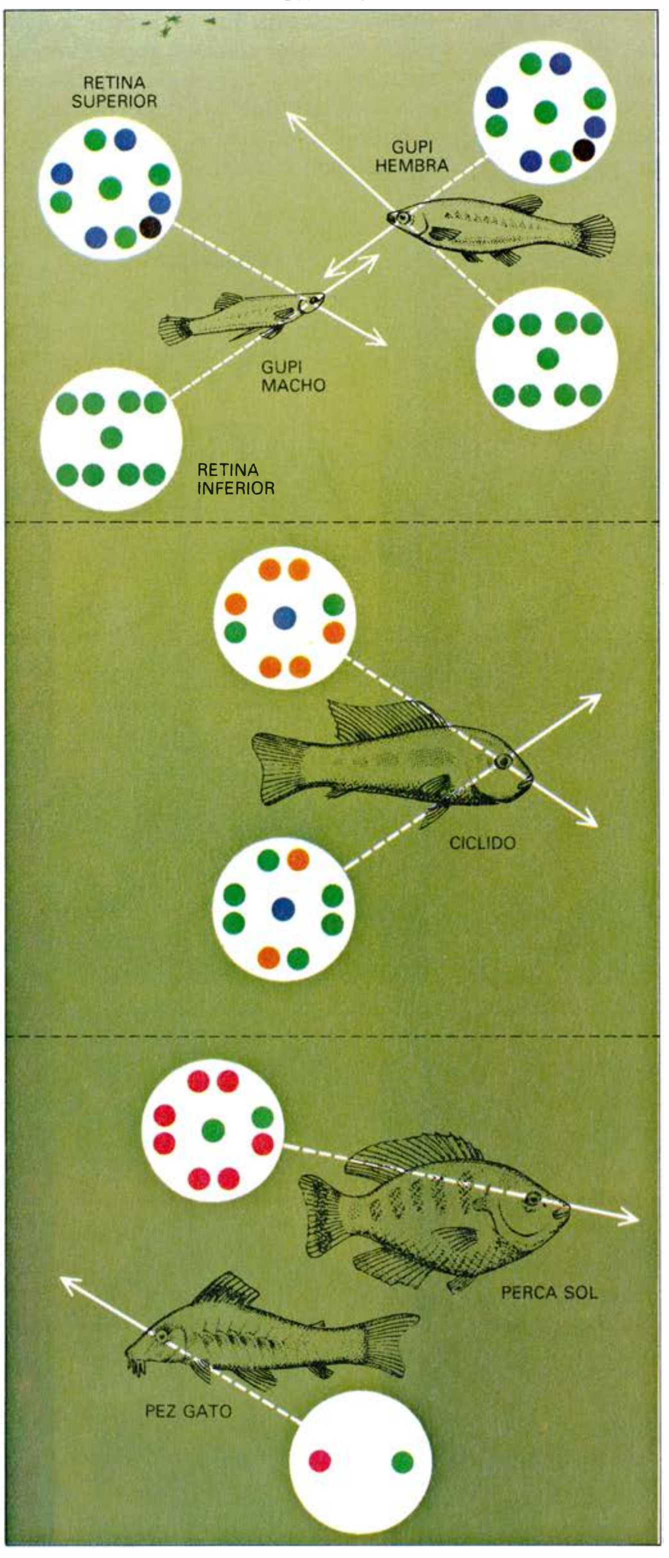

**RESPUESTA de una célula fotorreceptora a un estímulo visual; depende de la intensidad del estímulo y de las características filtradoras del pigmento absorbente. La longitud de onda de un fotón incidente no guarda relación con la respuesta de la célula, una vez que el fotón ha sido absorbido. La figura**

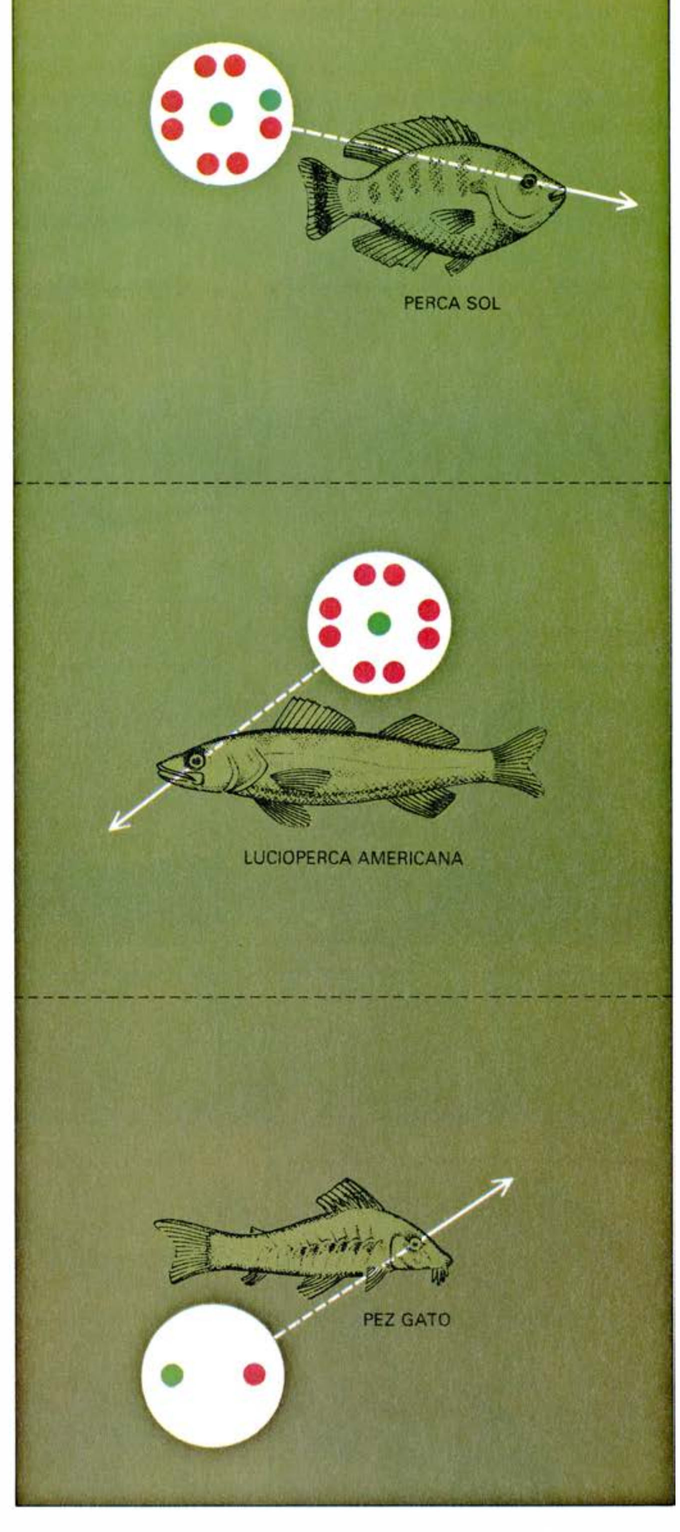
minación visual en las regiones del espectro de longitud de onda media a'larga, lo que precisa un amplio abanico de pigmentos visuales.

En la mayor parte de hábitats de agua dulce la utilidad de los conos sensibles al azul disminuye con la profundidad, porque la luz transmitida desde la superficie vira hacia el rojo en lugar de hacerlo hacia el azul. Los sistemas visuales de los peces dulceacuícolas que examinamos pueden dividirse en cuatro grupos, basados en la máxima sensibilidad de absorción de sus pigmentos visuales y en la morfología de sus células fotorreceptoras. En el primer grupo hay peces tales como el gupi (*Poecilia reticulata*) y el danio gigante (*Danio malabaricus*), que se hallan confinados a la región inmediata a la superficie. Sus sistemas visuales son similares a los




**indica de qué forma la respuesta de las células (*zonas sombreadas en azul y verde*) varía según la entrada de los tres colores que se indican en la ilustración de la izquierda. La respuesta de los conos sensibles al azul es similar para las entradas gris claro y azul (*a, c*). Las zonas de color gris oscuro dan respuestas reducidas (*b*), de modo que para un monocromático sensible al azul contrastarán con el fondo. La respuesta de los conos sensibles al verde, por otra parte, es similar para las entradas gris oscuro y azul (*e, f*), mientras que la respuesta para la entrada gris claro (*d*) contrasta con el fondo. Un sistema pigmentario dicromático puede ser asimismo la base de la visión de los colores (*g, h, i*). Una célula que verifique las diferencias entre las respuestas de los dos tipos de conos distinguirá, por tanto, la luz a una longitud de onda *A* de la luz a la longitud de onda *B*, sea cual fuere la intensidad de esta luz.**




**SENSIBILIDAD AL COLOR** de los peces, que está adaptada a las condiciones ambientales y a las necesidades del comportamiento basado en la visión. Se ilustran seis hábitats visuales de un lago de agua dulce; los peces se han dibujado en el tipo de hábitat visual en el que son activos. (No todas las especies que se representan se encontrarían normalmente en la misma masa de agua.) Los círculos coloreados representan esquemáticamente las pautas en mosaico de las células fotorreceptoras de cada especie; los colores corresponden a la máxima sensibilidad al color de cada pigmento visual presente en las células. La sensibilidad al color se desplaza al rojo con la profundidad, lo que corresponde al predominio creciente de luz de longitud de onda larga en el agua. Dos especies de peces presentan diferencias intrarretinales acusadas en la distribución de las células. La retina inferior del gupi (*Poecilia reticulata*), dirigida hacia arriba, está dominada por conos sensibles al verde. Por tanto, el gupi puede detectar objetos oscuros contra la luz que penetra en el agua, pero la retina inferior no es adecuada para discriminar colores. La retina superior, orientada hacia abajo, está constituida por los tres tipos de conos, por lo que es sensible a un amplio espectro de colores. En las exhibiciones de apareamiento, el gupi macho ocupa una posición por debajo o frente a la hembra, de modo que sus colores queden registrados sobre la zona más sensible al color de la retina de la hembra. La retina inferior del cíclido, dirigida hacia arriba, es asimismo básicamente sensible a la radiación de longitud de onda media, mientras que la retina superior, orientada hacia abajo, es más sensible a la luz de longitud de onda larga. Las diferencias corresponden a la distribución espectral de la luz espacial de fondo a lo largo de distintas visuales y a las variaciones entre las tareas visuales que cada especie desempeña. Las pautas retinianas en mosaico de la perca sol (*Lepomis macrochirus*), el pez gato (*Corydoras meyersi*) y la lucioperca americana (*Stizostedion vitreum*) son todas relativamente uniformes. La perca sol se alimenta de fitoplancton cerca de la superficie al atardecer o al amanecer y sigue al plancton en su migración hacia abajo durante el día; así pues, su entorno es siempre similar.

de las especies marinas de poca profundidad; caracterízanse por tres pigmentos visuales, sensibles de modo máximo en el violeta, el verde-azulado y el verde-amarillo.

La sensibilidad retiniana del gupi guarda estrecha relación con sus patrones de conducta. La retina superior, sobre la que se enfoca luz procedente de debajo y delante de su campo visual, constituye un mosaico de conos sensibles a tres regiones espectrales ampliamente espaciadas; está bien diseñada para la discriminación de los colores. La retina inferior, en cambio, sobre la que se enfoca la luz procedente de la parte superior del campo visual, aparece tapizada con células que contienen el mismo pigmento sensible al verde. John A. Endler, de la Universidad de Utah, señaló recientemente que cuando los machos exhiben su conspicua coloración para atraer a las hembras, lo hacen desde una posición situada por delante y ligeramente por debajo del objeto de su deseo. Esta posición en el campo visual de la hembra asegura que la imagen del macho caiga sobre la región más sensible al color de la retina de la hembra. La retina inferior, sensible al verde, es más adecuada para encontrar fragmentos oscuros de alimento cuya silueta se destaca contra la luz espacial vertical, predominantemente verde.

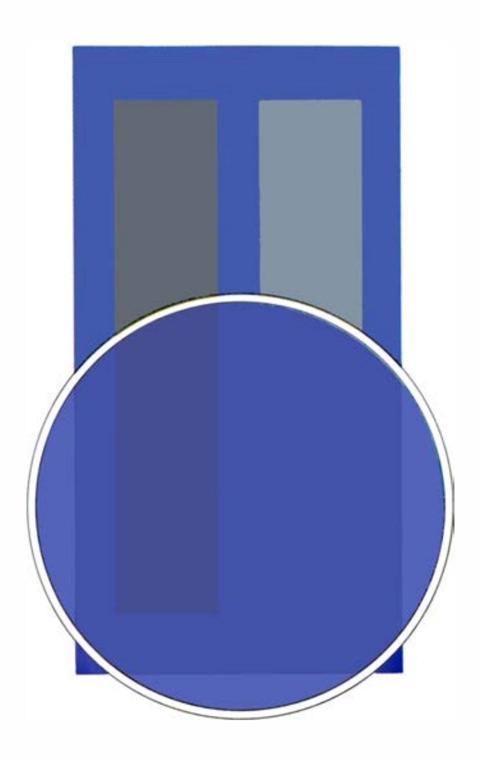
El segundo grupo de peces dulceacuícolas presenta también tres tipos de pigmentos visuales, pero sus sensibilidades máximas residen en las regiones del espectro de longitud de onda más larga que la de los pigmentos del primer grupo. Entre estos peces se cuentan el barbo de Sumatra (*Barbus tetrazona*) y el cíclido *Cichlasoma longimanus*; diríase que su sensibilidad a luz de longitud de onda larga es una respuesta evolutiva a la rápida pérdida de luz de longitud de onda corta en las aguas fuertemente teñidas en las que viven.

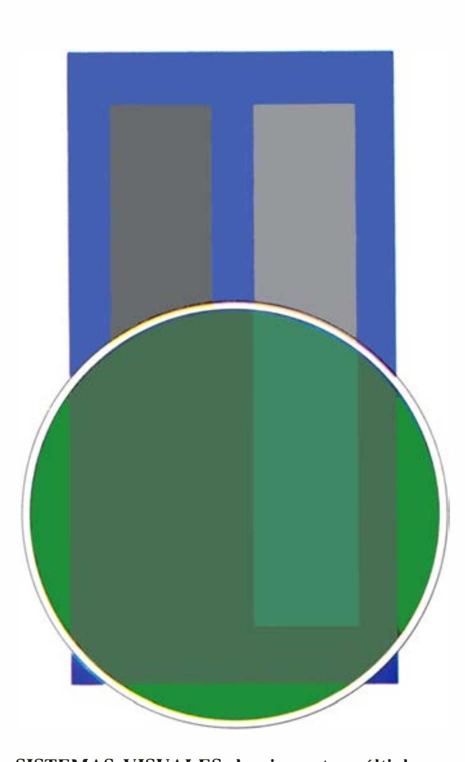
La perca sol de branquias azules (*Lepomis macrochirus*), la lucioperca americana (*Stizostedion vitreum*), las pirañas (*Serrasalmus sp.*) y otros peces del tercer grupo poseen en su retina pocas células sensibles al azul, cuando no carecen totalmente de ellas. Sí tienen células sensibles al verde y al rojo. Son activos sobre todo al amanecer o en el crepúsculo, cerca de la superficie, aunque muchas especies se alimentan durante el día en zonas más profundas de la columna de agua. De ahí que su ambiente espectral siga siendo aproximadamente el mismo a lo largo de todo su período activo. Los pigmentos sensibles al rojo los hacen más sensibles a la radiación de onda larga de lo que es el hombre. La llamada agua negra en la que habitan muchos de ellos está iluminada por luz espacial del infrarrojo cercano, que para ellos es visible.

La retina de las especies del cuarto grupo está enteramente constituida por bastones y conos sensibles al verde y al rojo. En estos conos no se han encontrado pigmentos sensibles al azul; en algunas especies parecen faltar también los pigmentos sensibles al verde. Es probable que la única razón por la que los peces conservan los conos sensibles al rojo sea que la mortecina luz espacial de fondo está muy desplazada hacia el rojo; de otra suerte, serían, a buen seguro, monocromáticos rojos. Las especies de este grupo incluyen numerosos peces gato (como *Corydoras meyersi*) y el llamado pez tiburón negro de cola roja (*Labeo bicolor*), ecológicamente similar.

Es probable que la visión de los colores, es decir, la capacidad de distinguir luz en razón de su longitud de onda además de su intensidad, evolucionara algún tiempo después del establecimiento de los sistemas visuales con dos pigmentos. Para ver los colores, el animal no sólo debe tener dos o más pigmentos visuales cuyos espectros de absorbancia se superpongan. necesita asimismo interconexiones neurales que comparen las señales de los fotorreceptores de manera apropiada. Para comprender cómo lo consigue, considérese el efecto de un estímulo monocromático rojo a una longitud de onda de 630 nanómetros sobre el ojo de un cíclido. El ojo del cíclido tiene tres pigmentos visuales, uno de los cuales absorbe el amarillo a una longitud de onda de 579 nanómetros y otro absorbe el verde a 532 nanómetros. Sea cual fuere la intensidad del estímulo rojo, el pigmento que absorbe el amarillo captará más fotones rojos que el que absorbe el verde. Por otra parte, un estímulo verde-amarillo a una longitud de onda de 540 nanómetros tendrá aproximadamente el mismo efecto sobre el pigmento que absorbe el amarillo que el que tiene sobre el que absorbe el verde, independientemente de la intensidad luminosa del estímulo.

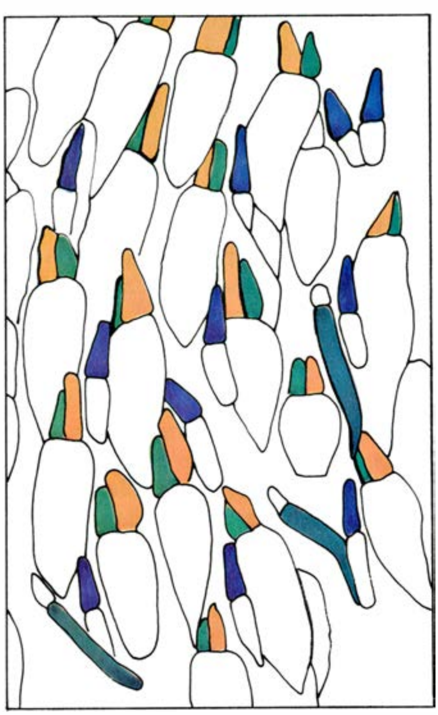
La respuesta de una neurona que sirva a ambos tipos de células fotorreceptoras puede depender de la diferencia entre las dos señales de entrada. Una célula de este tipo le permitiría al cíclido distinguir entre el rojo y el verde-amarillo, aunque la luminosidad de los



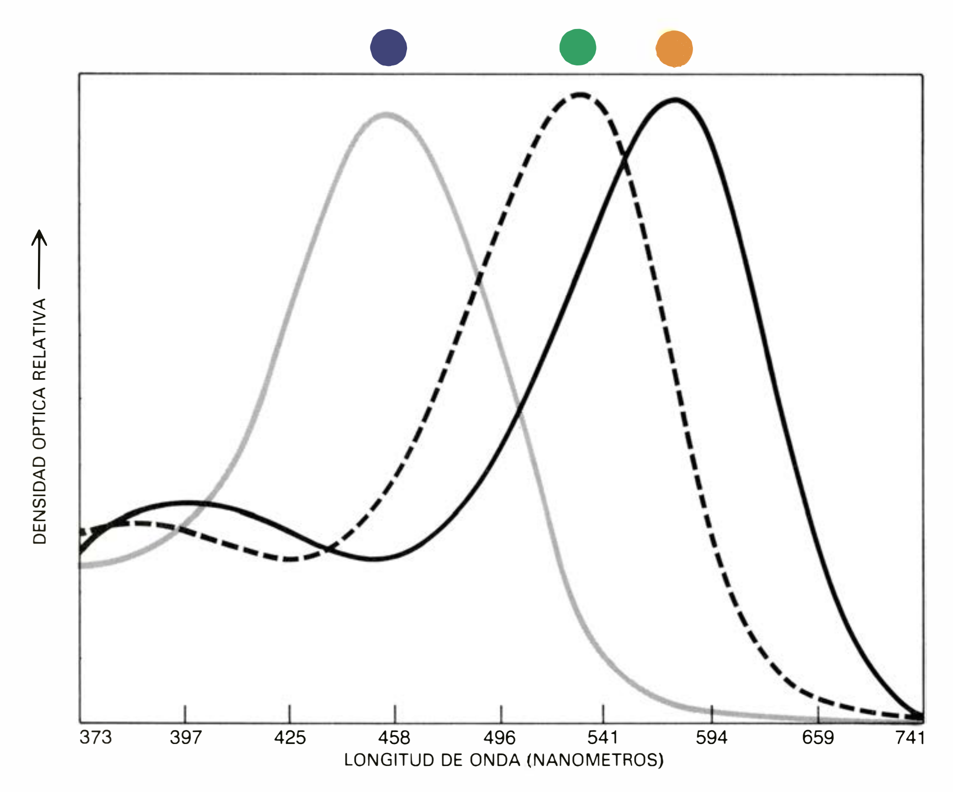


**SISTEMAS VISUALES de pigmento múltiple en los peces; pueden haber evolucionado inicialmente porque aumentaban el contraste de objetos claros y oscuros con la luz espacial, y no porque ayudaran a discriminar el color. Para un monocromático cuyo pigmento visual sensible al azul corresponda a la luz espacial azul que se encuentra en los hábitats marinos de aguas abiertas (*ilustración superior*), un objeto oscuro resulta perfectamente visible contra el fondo, pero un objeto claro es casi invisible. Un pigmento visual sensible al verde que no corresponda al color de fondo (*ilustración inferior*) proporciona contraste entre un objeto caro y el fondo, aunque un objeto oscuro es casi invisible. Los peces que incorporan ambos pigmentos pueden, por tanto, distinguir los objetos oscuros y claros de su entorno ambiental, aunque no dispusieran de las interconexiones neurales necesarias para discriminar exclusivamente en razón al color.**





**CONOS DE TETRA NEGRO**, aumentados aquí 500 diámetros, que difieren tanto en la forma como en el contenido pigmentario. Aparecen tres tipos: conos grandes dobles, compuestos de células separadas, que portan los pigmentos sensibles al anaranjado y al verde, y conos simples, más pequeños, que portan el pigmento sensible al azul. Se aprecian también unos cuantos bastones largos; en el tetra negro los bastones tiene su sensibilidad máxima a la luz verde. La fotomicrografía, tomada por Levine y MacNichol, se hizo aplastando las células que se muestran erectas en la ilustración superior de la página 85. Las células deben mantenerse planas entre dos cubreobjetos antes de sacar los espectros de absorbancia. En el diagrama, la posición de los pigmentos viene indicada por los colores a los que son más sensibles.

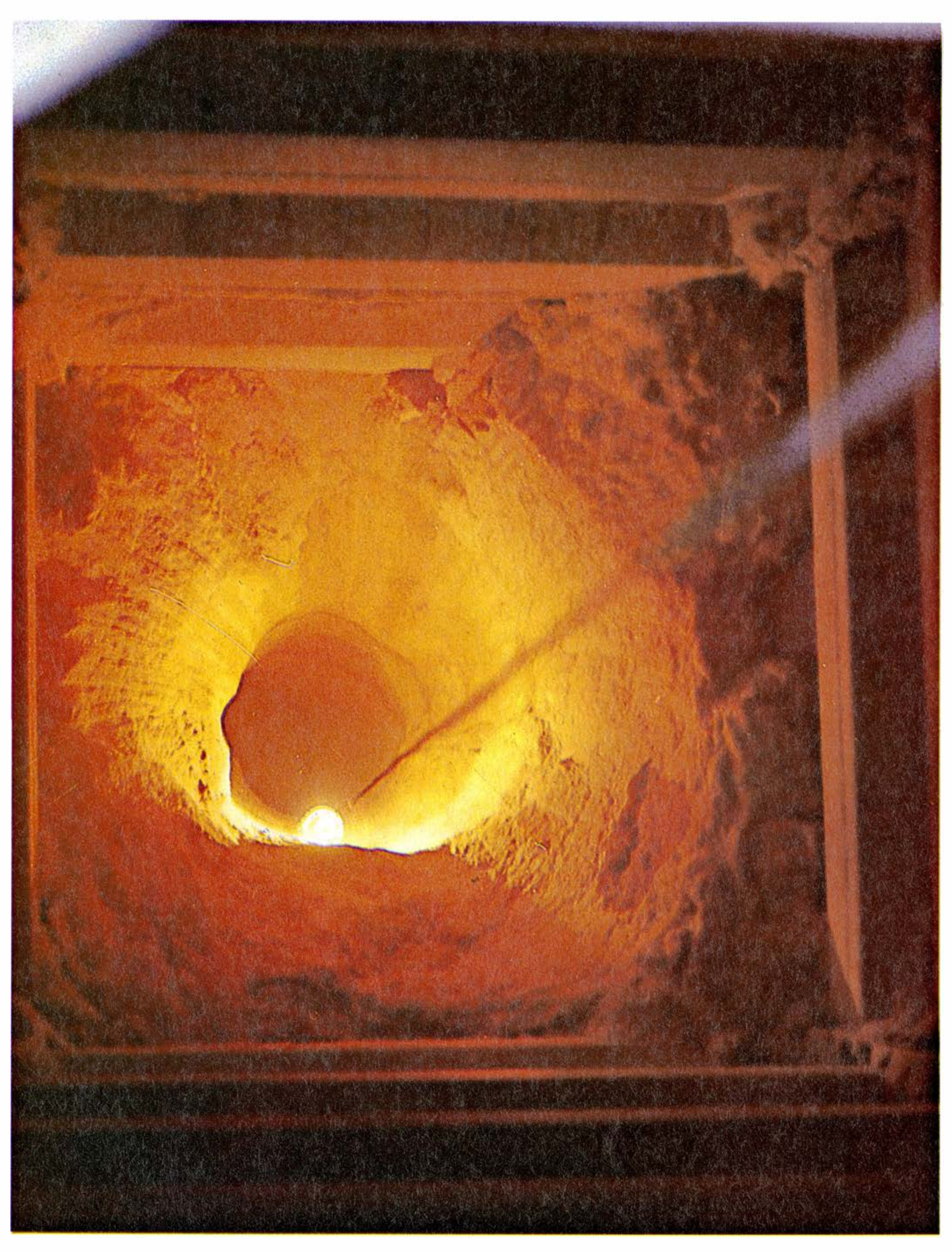



**ESPECTROS DE ABSORBANCIA** que muestran, para cada longitud de onda de la luz, la densidad óptica relativa de un pigmento visual; pueden relacionarse matemáticamente con la probabilidad de que un fotón de esta longitud de onda sea absorbido por un pigmento visual. Los gráficos corresponden a tres espectros de absorbancia, uno por cada pigmento del pez cíclido *Cichlasoma longimanus*. Los colores en el ápice de cada curva indican la apariencia al sistema visual humano de las longitudes de onda de la luz a la que cada pigmento es máximamente sensible, 455, 532 y 579 nanómetros, respectivamente. Por conveniencia del análisis, la máquina empleada por los autores registra la absorbancia de los pigmentos como una función de la frecuencia. De ahí que al recurrir a curvas para representar la absorbancia en función de la longitud de onda, los incrementos en la longitud de onda varíen a lo largo del eje horizontal.

dos colores medida por una clase de los conos del cíclido pudiera ser idéntica. Las células que procesan señales procedentes de fotorreceptores de diferentes clases fueron descubiertas por primera vez en las retinas de los peces por el fisiólogo sueco Gunnar Svaetichin y por uno de nosotros (MacNichol) en la década de 1950. Se las denomina células cromoantagónicas, y se han encontrado en varios niveles del sistema visual de muchas especies.

Las células cromoantagónicas dependen de la diferencia entre señales fotorreceptoras, por cuyo motivo la discriminación del color es más precisa en aquellas regiones del espectro donde los espectros de absorbancia de por lo menos dos pigmentos visuales se solapan y presentan pendientes distintas. Si tales espectros ofrecen la misma pendiente o no se superponen, la diferencia en la respuesta de las dos clases de fotorreceptores asociadas es constante y, pobre, la discriminación del color. La adición de un tercer pigmento, o incluso de un cuarto, a un sistema visual, junto con las células cromoantagónicas apropiadas, permiten identificar el color en estas regiones espectrales "muertas". Naturalmente, un tercer o un cuarto pigmento puede asimismo soportar la sensibilidad absoluta de un sistema visual para una banda de longitudes de onda más amplia todavía que la que corresponde únicamente a dos pigmentos.

Dadas las ventajas evolutivas de la discriminación del color sobre la capacidad de distinguir meramente la intensidad de la luz, ¿por qué no es universal entre los teleósteos la visión de los colores? Para que una retina sensible al color funcione adecuadamente debe hallarse bañada por suficiente luz de una amplia banda de longitudes de onda que estimulen señales procedentes de todos los tipos de conos. Las células fotorreceptoras que no emiten señales dejan "agujeros" en la imagen visual. Los agujeros degradan la imagen, y así, cualesquiera pigmentos de cono en la retina que no contribuyan con frecuencia a la imagen visual son, de hecho, disfuncionales. Un pez que sólo se muestre activo de noche o en el crepúsculo, o viva en las profundidades del mar, raramente encuentra luz suficiente para estimular siquiera a los conos. Para cualquiera de estos peces, y a lo que parece para muchos de los primates emparentados con el hombre, el precio de la supervivencia en la oscuridad ha sido la pérdida de la sensibilidad al color.



**CUERPO DE UN SILO REAL** fotografiado desde la parte alta de la celda e introduciendo la iluminación adecuada. Se aprecian las chimeneas de vaciado, las bóvedas y el producto que ha quedado retenido en paredes y tolvas. Los silos están concebidos para almacenar los productos más diversos: líquidos y sólidos. Los sólidos de los que trata el autor en el artículo son granulares y pulverulentos. Se llaman granulares los productos cuyas dimensiones de partícula oscilan entre 300 milímetros y 5 milímetros. Desde este último tamaño hasta las 50 micras, se habla de productos pulverulentos. Ejemplos de los primeros son el trigo, el arroz, la cebada, arenas, tierras, etcétera; ejemplos de los segundos serían las harinas, feldespatos, arcillas, cementos, etcétera.

# Silos

*Las deformaciones, fallas, grietas, hundimientos y explosiones que ponen fuera de uso esos depósitos débense a un diseño erróneo por desconocimiento del comportamiento del producto almacenado*

Juan Ravenet

Aunque el afán de almacenar y reservar grano para época de carestía es tan antiguo como la propia agricultura, el diseño científico de los silos es bastante moderno. En su forma actual, los silos son depósitos cuya sección recta puede ser cuadrada, rectangular, poligonal o circular; constan de una pared vertical, denominada cuerpo, un cierre inferior, que puede ser plano o en pendiente, denominado tolva, y un cierre superior o techo.

El silo está concebido para almacenar los productos más diversos: líquidos y sólidos. Los sólidos de los que nos ocuparemos aquí son granulares y pulverulentos. Se llaman granulares los productos cuyas dimensiones de partícula oscilan entre 300 milímetros y 5 milímetros: trigo, arroz, cebada, arenas, tierras, etcétera. Si las partículas van desde 5 milímetros de tamaño hasta 50 micras (milésimas de milímetro) se denominan pulverulentos: harinas, cementos, feldespatos, arcillas, etcétera. De 50 micras a una micra configuran el grupo de los pulverulentos extrafinos. Además de la razón de magnitud, interviene la cohesión, propiedad exclusiva de los productos pulverulentos.

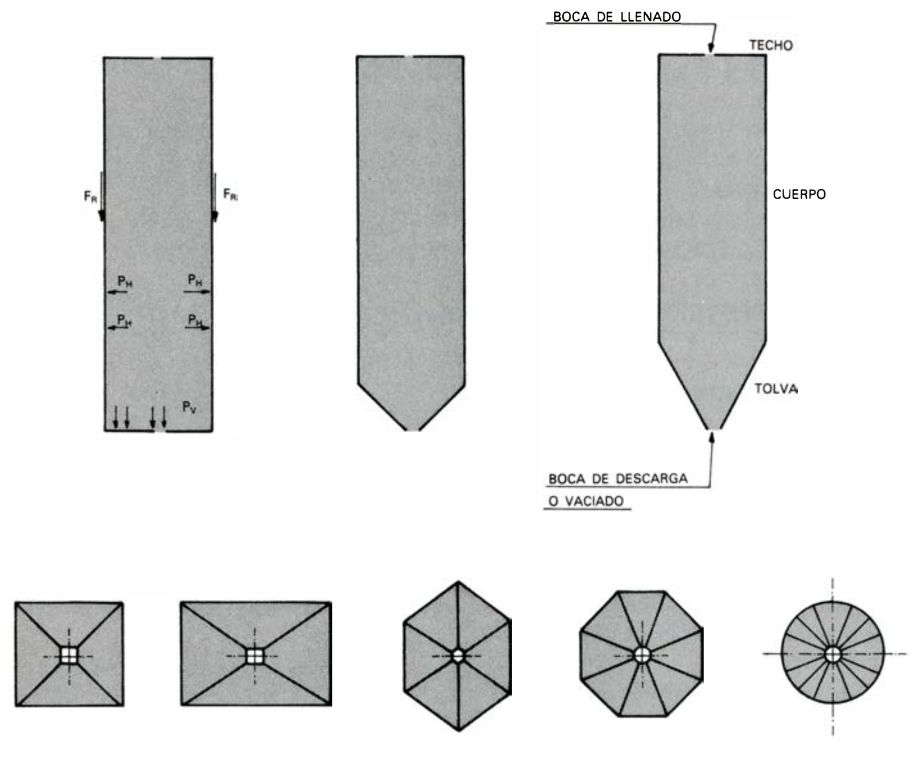
Podemos reducir a tres las fuerzas fundamentales que el sólido almacenado ejerce sobre las paredes y tolva de un silo: horizontales, verticales y de rozamiento. Las fuerzas horizontales, que simbolizaremos $P_H$, son perpendiculares al cuerpo o pared vertical. Las fuerzas verticales, $P_V$, son perpendiculares a la tolva. Las de rozamiento actúan sobre la pared comprimiéndola verticalmente.

El diseño de un silo se funda en el cálculo de esas tres fuerzas, conocidas hoy con bastante exactitud. Pero su comprensión no fue fácil, como se deduce del breve repaso histórico que vamos a hacer del problema. El primer silo de gran altura se construyó hacia 1870. Se desconocía entonces el comportamiento de los productos granulares almacenados, por lo que se levantaron las paredes atendiendo a las presiones hidrostáticas. (Se llaman así a las producidas por un líquido y cuyo valor es el producto de la altura desde la superficie superior hasta la sección considerada por la densidad del líquido. Las presiones hidrostáticas, en un punto determinado, son las mismas tanto si la pared es vertical como si es horizontal: las presiones verticales son iguales a las horizontales.) Los espesores de las paredes, en el caso del hormigón armado que era el material empleado en esas fechas, superaban los 80 centímetros para silos de 40 metros de altura por 6 de diámetro. Hoy el espesor no sobrepasa los 20 centímetros.

En 1882, Isaac Roberts realiza en Inglaterra los primeros ensayos con productos granulares, para determinar las presiones en las paredes de la tolva. Experimentó en maquetas de madera de base hexagonal y cuadrada. En el segundo caso medía el silo tres metros de lado por 15 de altura. Llegó a la conclusión de que las presiones sobre el fondo eran sólo del 25 por ciento de la presión hidrostática y las laterales, del 12,5 por ciento de dicha presión hidrostática. Entre otras cosas, el ensayo de Roberts ponía de manifiesto, pues, el diferente comportamiento entre productos granulares y líquidos. Los primeros evidenciaban un ángulo de rozamiento interno entre partículas, así como un ángulo de rozamiento entre partículas y paredes del silo. En virtud de lo cual sólo el 25 por ciento de la masa almacenada descansaba sobre el fondo; el 75 por ciento restante lo absorbían las paredes vía rozamiento. Las presiones laterales, que se cifraban en la mitad aproximada de las verticales, mostraban un desarrollo exponencial y, a partir de cierta profundidad, la curva alcanzaba la presión máxima. Los productos líquidos, por su parte, carecían de cohesión y de rozamiento entre sí y con las paredes. Todo el peso de la masa líquida descansaba sobre el fondo: las presiones laterales eran hidrostáticas y las de rozamiento brillaban por su ausencia.

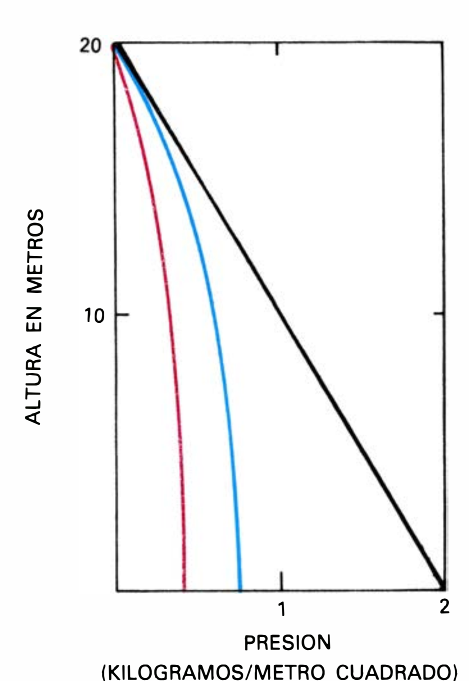
En esa línea, del trabajo de Roberts se desprendía también que el depósito diseñado para almacenar líquidos no servía para guardar grano, pues las fuerzas de rozamiento deformarían el tanque por compresión: el grano almacenado se apoyaría en las paredes originando una fuerza vertical mayor que la prevista en el cálculo. A la inversa, el silo diseñado para almacenar productos granulares no era apto para contener líquidos, ya que las presiones laterales abrirían el silo.

En 1895, H. A. Janssen, ingeniero alemán, daba expresión matemática a los valores experimentales obtenidos por Roberts. Su estudio se fundamentaba en el equilibrio estático de una rebanada elemental, o cantidad pequeña de sólido que se toma como muestra. Para resolver el problema de la determinación de la razón entre presiones horizontales ($P_H$) y presiones verticales ($P_V$), la llamada $K$, recurría a la teoría de mecánica del suelo de Coulomb y Rankine. Sin entrar en los pormenores de la expresión, bástenos saber que obtuvo valores de $K$ variables entre 0,3 y 0,6, que dependían del tipo de producto ensayado y de las dimensiones del silo. (Significa ello que si suponemos que la presión que actúa sobre el fondo de un silo es de 10.000 kilogramos por metro cuadrado, para $K$ igual a 0,3 la presión lateral valdrá 3000 kilogramos por metro cuadrado; si $K$ vale 0,6, la presión lateral será de 6000 kilogramos por metro cuadrado, y necesitaremos un doble espesor de pared que en el caso anterior.) Entre las conclusiones de interés a las que llegó Janssen destaquemos una: las presiones laterales eran las mismas para un silo cuadrado que para el circular de diámetro igual al lado.




**LA SECCION RECTA DEL SILO** puede ser cuadrada, rectangular, hexagonal, octogonal, poligonal o cilíndrica. En alzado, consta de una pared vertical, o cuerpo, un cierre superior (techo) y un cierre inferior, la tolva, con el orificio de descarga. En un silo actúan fundamentalmente tres tipos de fuerzas, a saber: fuerzas horizontales ($P_H$), que son perpendiculares al cuerpo, verticales ($P_V$), perpendiculares a la tolva, y fuerzas de rozamiento ($F_R$), que actúan sobre la pared comprimiéndola verticalmente.

Dos años más tarde, W. Airy, mediante el uso de la cuña de deslizamiento y apoyado en la mecánica del suelo, determina las presiones laterales en función de tres factores conocidos: densidad del producto almacenado, ángulo de rozamiento interno del material que se guarda y ángulo de rozamiento entre dicho producto y la pared del silo. En su expresión matemática no interviene, pues, *K*. (La cuña de deslizamiento, llamada también cuña en movimiento, se forma cuando se abre la boca de salida del silo y parte del grano almacenado discurre mientras parte se mantiene en reposo; al deslizarse el grano, lo hace en forma de cuña.)




**DETERMINACION DE LAS PRESIONES** en un silo: laterales de Janssen (*rojo*), que son las de llenado: sobrepresiones de vaciado con el coeficiente 2,32 (*azul*) y presiones hidrostáticas (*negro*).

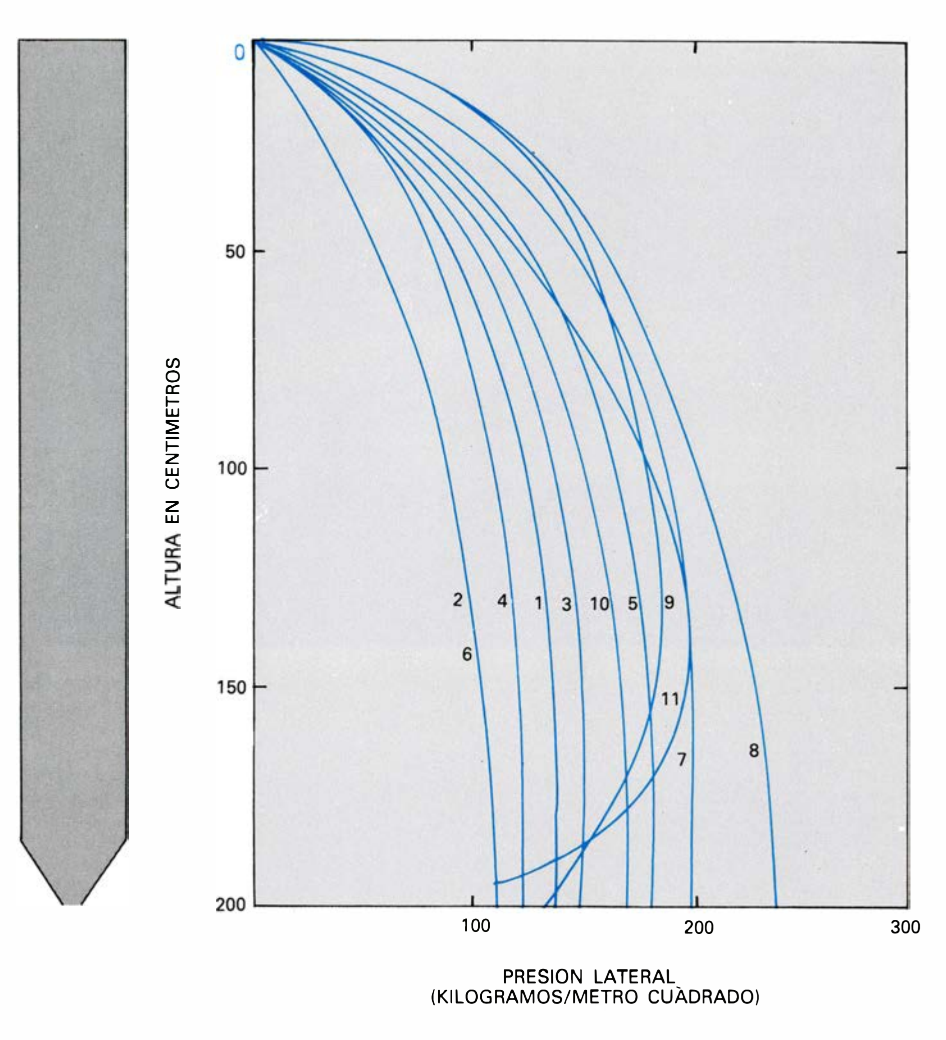
A principios de nuestro siglo, el problema que planteaban los silos norteamericanos resultaba de su misma textura: estaban levantados con madera. Su construcción se realizaba mediante la unión de tablones hasta alcanzar una anchura máxima de 20 centímetros en función de la dimensión de la celda. La altura máxima con ese grosor era de 20 metros, espesor que disminuía a medida que se superaba ese tope. La práctica era la que dictaba las medidas idóneas: no se regían por ninguna teoría física para determinación de presiones laterales y presión sobre el fondo. Pero la compresibilidad de la madera, que producía una falta de rigidez vertical, y, sobre todo, su fácil combustión obligaron a cambiar los materiales de construcción y, de paso, a estudiar las presiones laterales y sobre el fondo ejercidas por el grano. Jamieson, un ingeniero canadiense, realizó ensayos en silos reales y en maquetas para determinar esas mismas presiones durante las fases de llenado y vaciado. En este último, las presiones laterales eran un 5 por ciento mayores que las del llenado. Si las paredes del silo eran lisas, mostraban los trabajos en maqueta, las presiones laterales eran de hasta un 20 por ciento mayores que en el caso de paredes rugosas.

Pero casi todos los silos que se fueron construyendo siguiendo las ideas de Roberts, Janssen, Airy y Jamieson sufrieron serias deformaciones hasta el punto de quedar muchos de ellos fuera de servicio. ¿Por qué? La razón estriba en que se fundaron en equilibrios estáticos (suponiendo, pues, que el sólido almacenado en el interior del silo se hallaba en reposo), que corresponden a los procesos de llenado. La verdad es que los procesos de vaciado dan origen a equilibrios elastoplásticos, con incrementos importantes de presiones laterales que se desconocían: al abrirse la boca de salida y empezar a descargarse el silo, el sólido almacenado se pone en movimiento y se presentan tales equilibrios de carácter elastoplástico. Tampoco se sabía nada del movimiento de los productos granulares en el interior del silo y, por consiguiente, difícilmente iban a colocar sus rudimentarios aparatos de medición en los puntos donde iban a aparecer las máximas presiones de vaciado.

El sinnúmero de averías que sufrían las instalaciones de todo el mundo llamó de nuevo la atención de los ingenieros en la década de los 40. Esta vez se centraron ya en las presiones laterales durante el vaciado. Se verifica entonces que las presiones de llenado coinciden con las de Janssen. Y se establece también, por esas fechas, el coeficiente de sobrepresión, definido como la relación entre las presiones de vaciado y las de llenado. Coeficiente que permitirá deducir la vida del silo, ya que cuanto mayor sea este coeficiente más durará el silo. Hoy en día, y para productos granulares, se aplica un coeficiente máximo de 2,32 (larga vida sin deformaciones) y mínimo de 1 (deformaciones del silo a corto plazo). En la década de los 40 se empleó también el coeficiente de sobrepresión a la solución de los problemas de deformación que pudiera sufrir la estructura.

Marcel Reimbert presenta, en 1943, los ensayos realizados en maquetas para determinar los esfuerzos de los materiales pulverulentos (harinas, cementos, etcétera) en las paredes. Establece coeficientes de sobrepresión del orden de 1,95 en la parte alta de la celda. (El máximo obtenido por Platonov es de 2,32.) Pero en los experimentos realiza-

dos en 1951 por los norteamericanos Caughey, Tooles y Sheer no se hallaron incrementos en las presiones laterales durante el vaciado. Vuelven a encontrar coeficientes de sobrepresión (del orden de 2) Werner Bergau y Torsten Kallstenius en 1959, en Suecia, y ese mismo año, en Africa del Sur, Michael S. Zakrewski; resultados que confirmaría, a principios de la década siguiente, Alexander M. Turitzin, de los Estados Unidos. Paralelamente, los ingenieros soviéticos Takhtamishev, V. S. Kim, A. P. Kovtum y P. N. Platonov, en ensayos acometidos en silos reales, demostraron un coeficiente de sobrepresión cifrado en 2,32. Se trata de los valores máximos alcanzados en silos reales, cuya construcción eran fundamentalmente de hormigón armado.



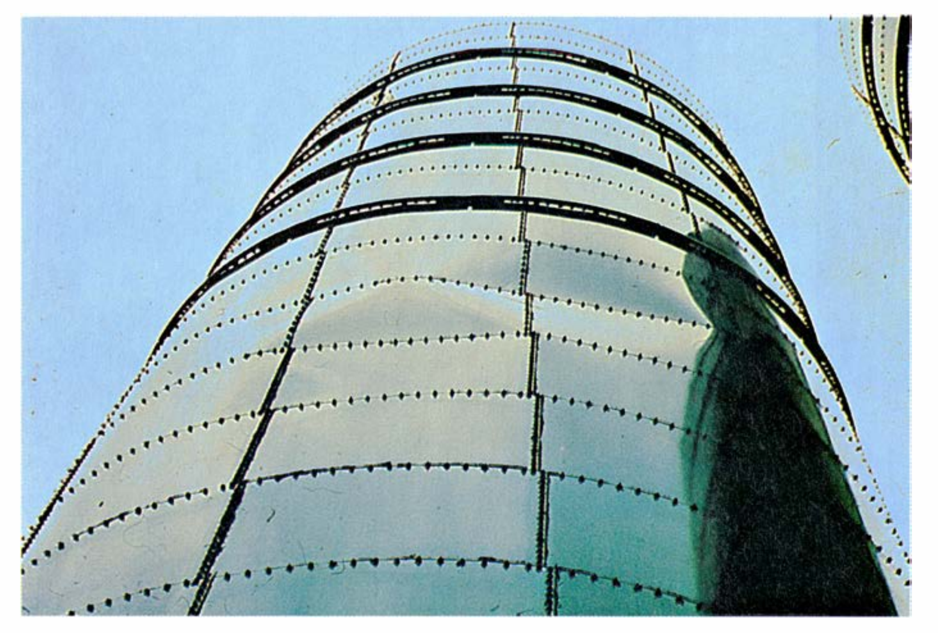

**DISPERSION DE RESULTADOS** en torno a las presiones laterales a lo largo de la historia de los silos. Para obtener este estadístico se ensayó en una maqueta estándar cuadrada de 30 centímetros de lado por dos metros de altura con los valores aducidos por Roberts (*1*), Janssen (*2*), Airy (*3*), Jamieson (*4*), Reimbert (*5*), Caughey, Tooles y Schear (*6*), Bergau, Kallstenius y Lecnzner (*7*), Platonov (*8*), normas alemanas DIN 1055, hoja 6 año 1964 (*9*), Handley (*10*) y Janike y Johansson (*11*). Compárese este gráfico con el anterior y se observará que la curva *2* se corresponde con la curva en rojo y la *8* con la curva en azul.

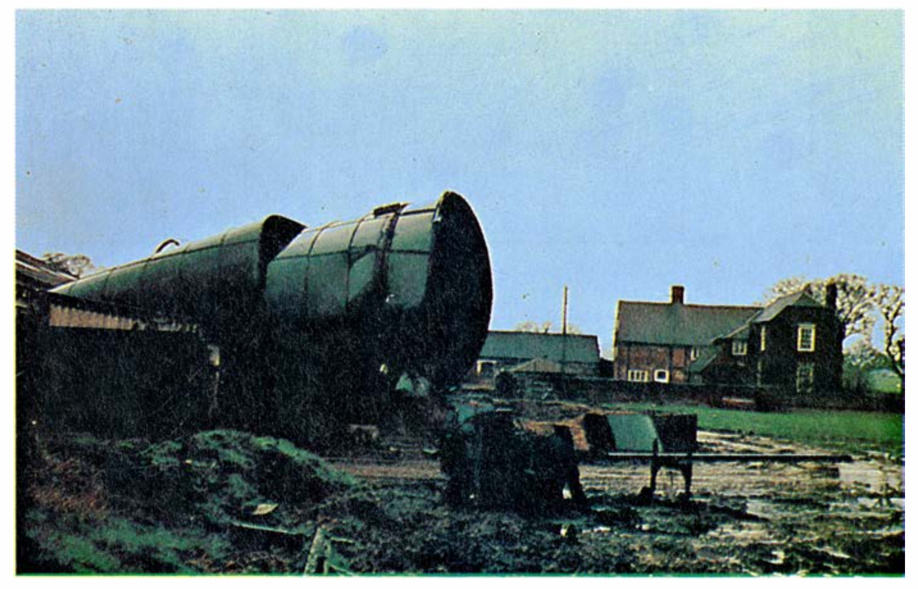
La década de los sesenta sería pródiga en avances significativos: Las normas alemanas DIN 1055, hoja 6 del año 1964, prevén incrementos en las presiones laterales durante el vaciado de sólo el 65 por ciento, es decir, un coeficiente de sobrepresión de 1,65, en tanto que en la parte alta de las celdas alcanzan el 100 por ciento. M. F. Handley, que había defendido en 1967 una tesis sobre la medición de las fuerzas internas durante el vaciado granular, realiza dos años más tarde un estudio experimental inédito para la determinación de presiones laterales y verticales en silos: la novedad de la investigación radicó en que introdujo en la maqueta a experimentar, y mezclada con el producto a almacenar, una píldora radiosensitiva que medía presiones laterales y verticales. (Consiste la píldora radiosensitiva en un pequeño cilindro de dos centímetros de alto por uno de diámetro que, conectado a un receptor y por emisión de ondas de frecuencia variable en función de la presión que el grano ejerce sobre él, mide, en efecto, las fuerzas laterales y verticales.) Durante el vaciado y en la zona de intersección del cuerpo, o paredes del silo, con la tolva, la presión disminuía bruscamente para luego volver a aumentar en la base.

En 1968, A. W. Jenike y J. R. Johanson definen la relación entre presiones activas de la fase de llenado y presiones pasivas, correspondientes a las de vaciado. Entre unas y otras se presentaba una onda de sobrepresión que se desplazaba hacia arriba a gran velocidad; cuando tocaba la pared, producía una presión puntual en una banda extraordinariamente fina que superaba, en más de 50 veces, las presiones de llenado. (Esta presión puntual la ha detectado el autor de este artículo en un silo de 16 metros de altura; la deformación de la pared alcanzó sólo 90 centímetros, y se produjo aproximadamente a unos 8 metros del suelo.)

Al año siguiente, Klaus Pieper investiga la influencia que tiene sobre las presiones laterales la posición de la boca de salida. Sabido es que si dicha boca se halla en el centro geométrico del silo, la excentricidad es cero; si se encuentra junto a la pared, la excentricidad es del 100 por ciento. Cuando la boca de salida presenta una excentricidad superior al 30 por ciento, en la pared opuesta a la boca de salida siempre concurren sobrepresiones, mientras que en la pared próxima a la boca de salida aparece, en la parte baja, una depresión y, en la parte alta, una sobrepresión. O. F. Theimer, S. S. Safarian, A. Lumbroso y R. M. Garg, en estudios inmediatamente subsiguientes, ponen un grado más de incertidumbre, por la disparidad de resultados a propósito de las presiones laterales, en el complejo problema de la teoría de silos. A modo de resumen, digamos que las hipótesis por las que se han guiado los autores aquí reseñados y otros más, a lo largo del último siglo y en lo concerniente a la determinación de las presiones laterales, presentan una dispersión del 120 por ciento. Se hacía pues imperiosa una nueva vía de investigación que permitiera deducir con mayor exactitud las presiones laterales y evitar riesgos a ingenieros y calculistas. En esa nueva senda lleva el autor trabajando diez años largos.

Los ensayos, experimentados primero en maquetas, se han sometido a contraste en silos reales en pleno funcionamiento. Me serví de dos tipos de maquetas. Era el primero una maqueta rectangular de caras transparentes, en la que se podía ver el movimiento de los productos granulares y pulverulentos. Se coloreó, a tal fin, el producto almacenado, por capas; el coloreado nos habría de permitir verificar la forma del flujo de vaciado. ¿Qué información nos aporta el flujo? Por un lado







**SECUENCIAS DE LA CAIDA de un silo metálico, tomadas desde ángulos distintos. Un cálculo incorrecto de las presiones laterales produjo, al poco tiempo de su entrada en funcionamiento, la deformación que se aprecia en la fotografía superior. En la del centro, el silo se ha derrumbado, y, en la fotografía inferior, que se tomó varios días después, las chapas se trabajan para su posterior aprovechamiento.**

posibilita predecir las presiones que aparecen en las paredes durante el vaciado y, por otro, nos muestra el movimiento del producto almacenado durante el vaciado en función del diseño del silo, dato este muy importante para conseguir una calidad uniforme en los procesos industriales de fabricación y transformación.

Consistía el segundo tipo en una maqueta construida con placas de caras transparentes en las cuales se colocaron galgas extensométricas, para poder medir presiones laterales de llenado y vaciado en función de la forma y la situación de la boca de salida. Las galgas son aparatos que nos permiten determinar deformaciones en las paredes, y mediante una fórmula matemática, establecer las presiones laterales. En ambos tipos de ensayo, el producto utilizado fue mijo, en grano y triturado.

Una vez conocido el movimiento del producto almacenado y estimadas las presiones que pueden aparecer en las paredes, podemos ya proponer las hipótesis de cálculo que nos permitirán efectuar un diseño correcto, con los coeficientes de seguridad suficientes en toda clase de construcción: hormigón armado, madera, metal, etcétera. La mayoría de los silos averiados o derrumbados han tenido como causa más directa unas hipótesis de cálculo incorrectas, en definitiva, un desconocimiento del comportamiento del producto granular en el interior del silo, también llamado celda, y, por tanto, de las presiones en las paredes y tolvas.

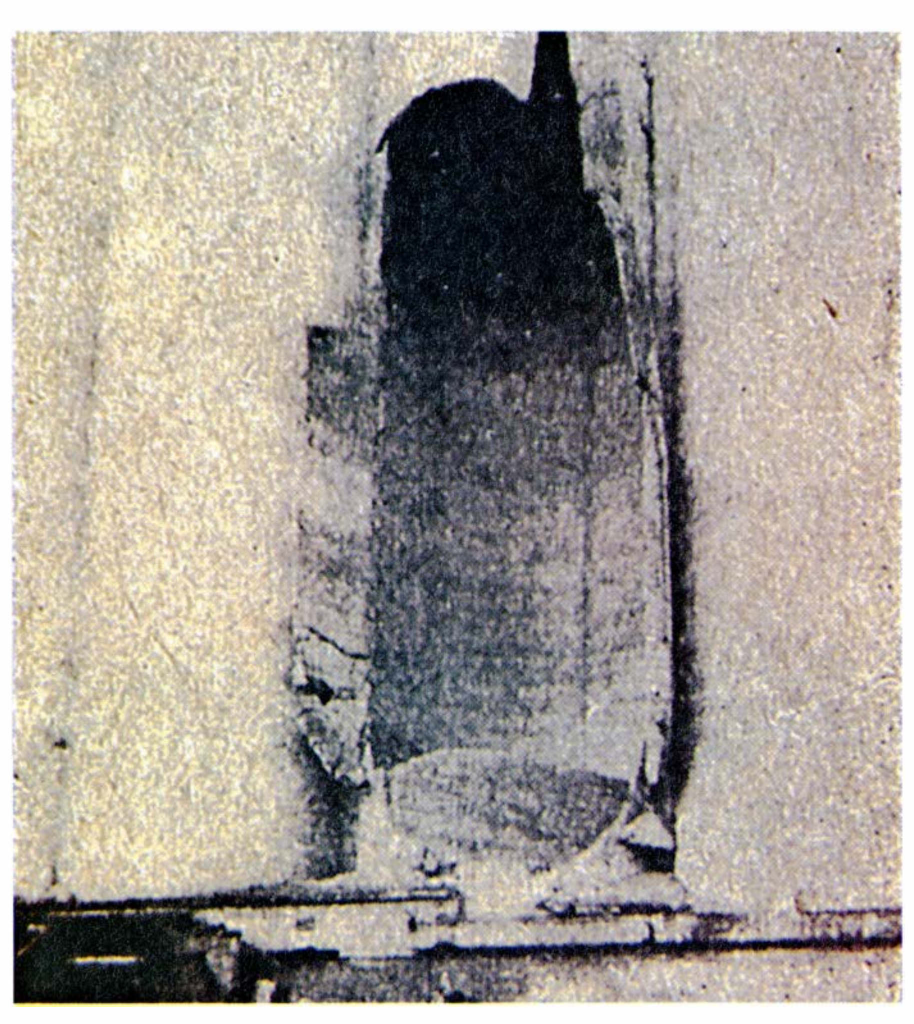
¿De qué depende el flujo de vaciado de un producto granular en un silo? De los siguientes parámetros: relación entre altura y el diámetro o lado de la celda, ángulo de rozamiento entre el producto granular y la pared, ángulo de rozamiento interno del producto, pendiente de la tolva y dimensiones de la boca de salida.

Con estos prenotandos delante ideé diversas maquetas para visualizar los distintos comportamientos. En el ensayo, la relación altura-lado designará la relación entre la altura del silo y la anchura de la base. El valor que dicha proporción suele tener en los depósitos reales es de 6: 5 metros de diámetro y 30 de altura. En maqueta de fondo plano, un valor de seis en la relación altura-lado y vaciado centrado se observa lo siguiente: al abrir la boca de salida, e iniciarse el vaciado, se produce un cono invertido que corta la pared a una altura igual a 0,7 veces el lado de la celda. El gradiente de velocidad se mantiene prácticamente constante en

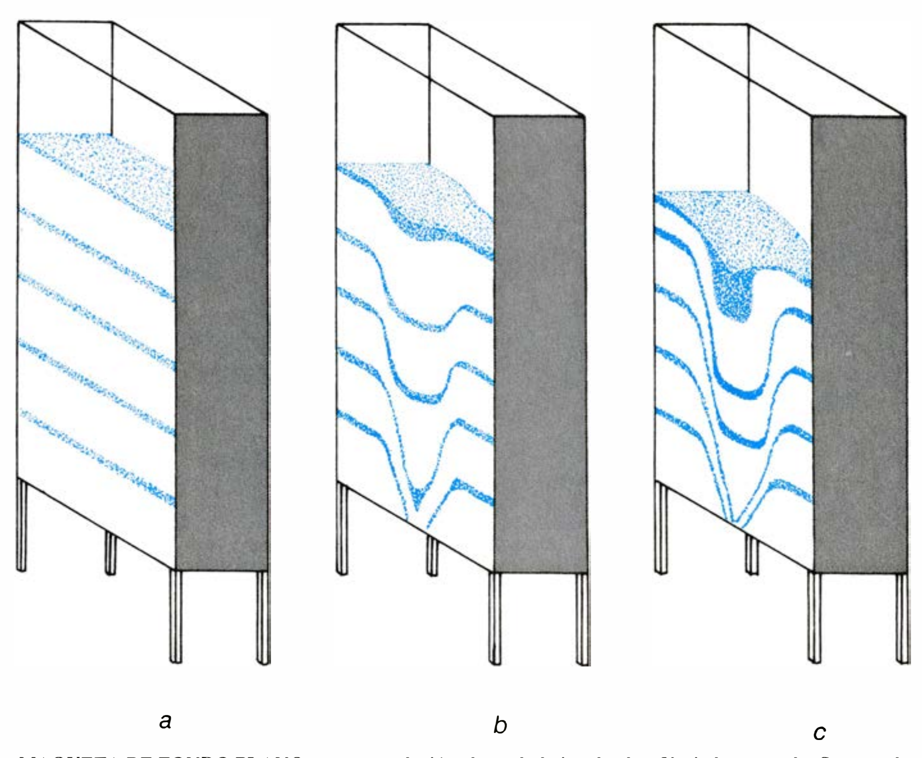
una sección recta de la celda situada por encima de una altura igual a 0,7 veces el lado. En la proximidad de la pared, y debido a la fricción dinámica entre el producto granular y la misma, se produce un efecto retardado, quedándose el grano a una altura mayor. (Para hacerse una idea más exacta de lo que ocurre asocie el lector la noción de fricción dinámica a la de un frenado de coche con patinaje de las ruedas; la fricción estática correspondería a la del frenado del coche sin patinar.) El vaciado se realiza por capas, sin problemas de desmezcle o pérdida de la uniformidad. La medición de presiones por galgas extensométricas permite determinar valores por encima de una altura total igual a 0,7 veces el lado. Se obtiene un coeficiente de sobrepresión de 1,65. ¿Qué lección se saca de este experimento? Que la solución ideal para este tipo de silos de almacenamiento de granos es la de vaciado central y una relación altura-lado superior a 4, si bien se han de prever presiones laterales elevadas que pueden provocar grietas en celdas de hormigón y deformaciones en las metálicas.

Construimos otra maqueta de las mismas características, salvo en la relación altura-lado, que aquí valía dos la proporción. ¿Qué ocurre? Al abrir la boca de salida se forma el cono invertido de vaciado, cuya generatriz corta la superficie libre superior del producto granular antes que a la pared. Cerca de la boca de salida, la velocidad es muy elevada, mientras que en las proximidades de la pared el material se halla en reposo. En la parte superior de la maqueta el producto granular rueda sobre sí mismo hacia el centro del cono de vaciado. El material va descendiendo de forma heterogénea, originándose un desmezcle o pérdida de la uniformidad del grano almacenado, que afectará a la calidad del producto final en cualquier proceso de la industria. El vaciado centrado y la relación altura-lado igual o menor que dos es una solución que se utiliza en almacenamientos de coste reducido, si bien presenta el inconveniente reseñado de los desmezcles. Las paredes del silo y tolva no sufren incrementos de presiones importantes, ya que el coeficiente de sobrepresión es sólo de 1,30.

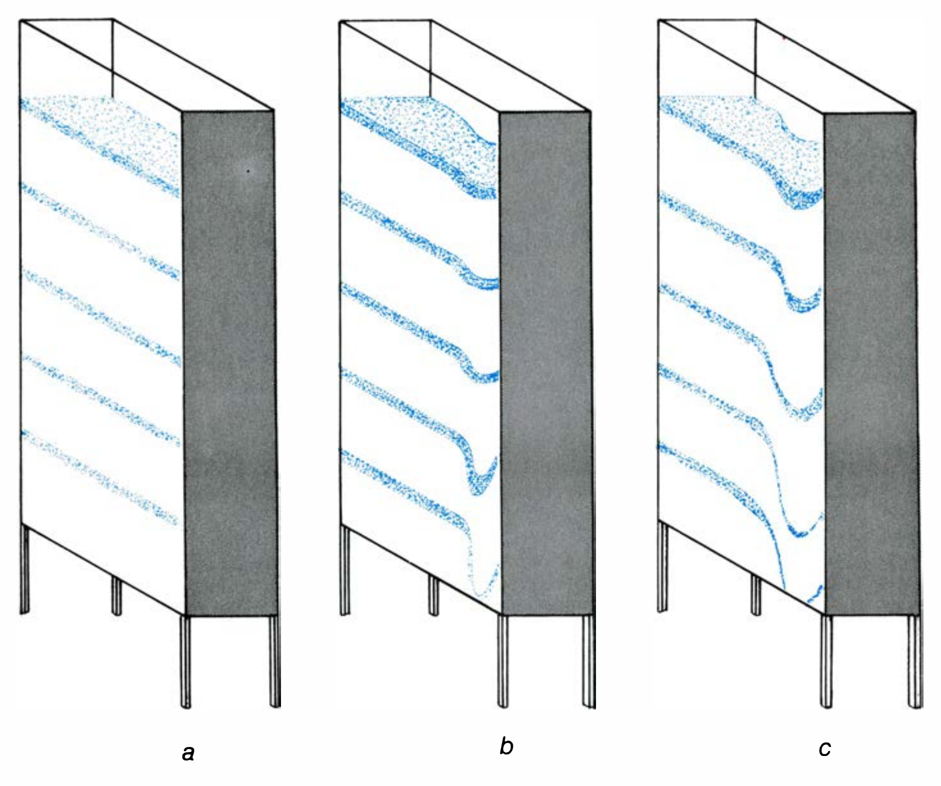
¿Qué ocurre cuando se cambian dos parámetros: el vaciado –de centrado a excéntrico– y la relación altura-lado? Repetí el ensayo, pues, en una maqueta de fondo plano, relación altura-lado igual a 7 y vaciado excéntrico. Al iniciarse el vaciado se produce el cono in-



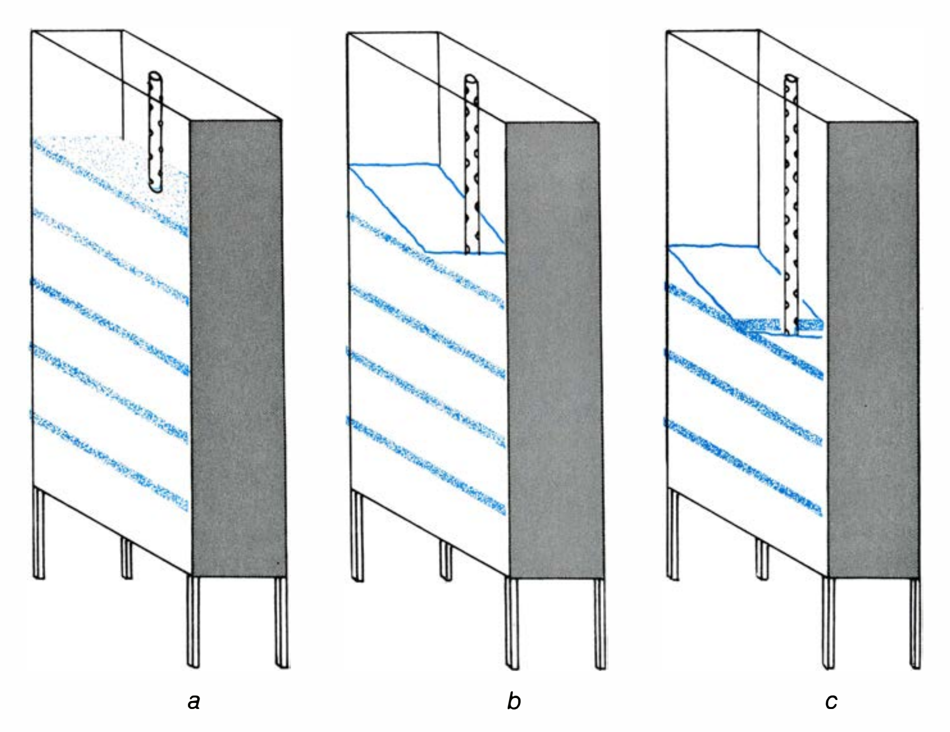
**ROTURA DE UNA CELDA** en un silo de hormigón. Al igual que en el caso anterior, en que se trataba de un depósito metálico, también aquí falló el cálculo de la determinación de las presiones laterales.




**MAQUETA DE FONDO PLANO,** con una relación altura-lado igual a dos. Vaciado centrado. Se trata de una maqueta de caras transparentes con mijo como material. Se ilustra la evolución del vaciado y el comportamiento del material en el silo. Mediante galgas extensométricas se calculó las presiones laterales durante el llenado y vaciado, dándonos un coeficiente de sobrepresión de 1,30 en la parte superior.




**MAQUETA DE FONDO PLANO,** con una relación altura-lado igual a 1,5 y vaciado excéntrico. Volvimos a usar mijo. Nos proponíamos examinar en esta maqueta el comportamiento del material en una celda baja. Colocamos, como siempre, galgas extensométricas en las paredes para determinar los coeficientes de sobrepresión. Estos fueron: en la pared próxima a la boca de salida, en su parte baja depresión del 0,74 y sobrepresión de 1,67 más arriba; en la pared opuesta a la boca de salida, sobrepresión de 1,48. El inconveniente de este diseño radica en la pérdida de estabilidad de la instalación por desplazamiento del centro de gravedad de la masa almacenada. (Las maquetas no están dibujadas a escala.)




**MAQUETA DE FONDO PLANO** dotada con tubo de vaciado estático. El tubo central taladrado nos permite realizar un vaciado a través del mismo y desde la superficie de arriba, ya que impide la entrada de material en zonas medias y bajas (*a*). Las dos ilustraciones siguientes (*b* y *c*) evidencian que el producto desciende por capas disciplinadas, comenzando por el estrato superior. Al permanecer la masa prácticamente inmóvil, el coeficiente de sobrepresión fue de sólo 1,36. El dispositivo falla cuando las impurezas y humedades que lleva el cereal lo tornan cohesivo y obstruye así muchos orificios. El vaciado se produce libremente y los coeficientes de sobrepresión pueden deformar e incluso llegar a romper las paredes.

vertido clásico, aunque asimétrico: es decir, por el lado de la boca de salida toca a la pared inmediatamente, en tanto que por el opuesto roza la pared a una altura igual a dos veces el lado. La asimetría del cono de vaciado produce efectos contrapuestos sobre las caras próxima y contraria a la boca de salida. La cara próxima a la boca de salida ha constituido un punto de polémica constante a la hora de determinar las presiones laterales que ejerce el grano.

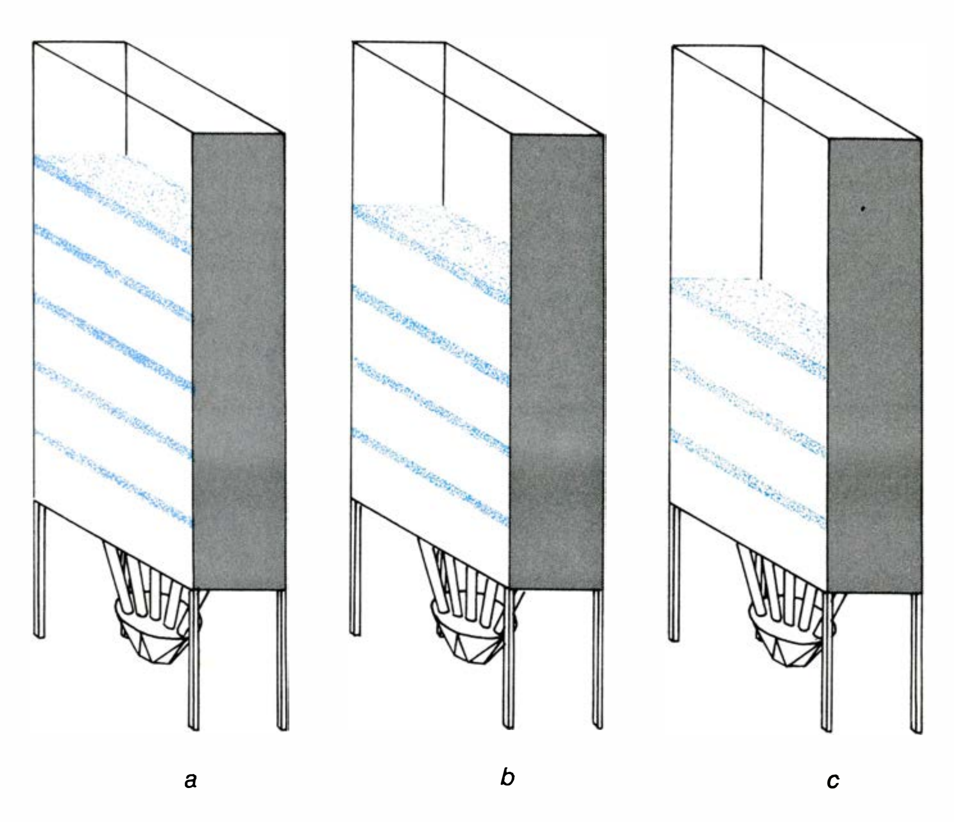
Las galgas extensométricas introducidas en el silo determinaron las siguientes presiones: en la pared próxima a la boca de salida, depresión en la parte baja con un coeficiente de 0,76, para pasar más arriba a una sobrepresión de 1,71; y, en la pared opuesta a la boca, débil sobrepresión de la parte baja que se incrementaba a medida que nos desplazábamos hacia arriba, hasta alcanzar una valor máximo de 1,95. El vaciado excéntrico pone a prueba la estabilidad de las instalaciones debido a la variación de presiones en las paredes de una misma sección del silo, por lo que cabe evitarlas en lo posible, sobre todo en estructuras que presentan poca resistencia a las ovalizaciones.

Una variante del ensayo anterior consistía en modificar la relación altura-lado, que la hice igual a 1,5. En esa maqueta de fondo plano y con vaciado excéntrico, el cono invertido de vaciado corta a la pared próxima a la boca de salida, casi en el mismo fondo de la maqueta; pero no corta a la cara opuesta por la sencilla razón de que la celda es muy baja. Volvemos a encontrarnos con un silo bajo, con los problemas de desmezcle aludidos. Las presiones se reparten así: en la parte baja de la pared próxima a la boca se produce una depresión con un coeficiente de sobrepresión de 0,74 y, de 1,67, en la parte alta. Por lo que concierne a la pared opuesta a la boca, la sobrepresión alcanza un valor de 1,48 en la altura media del muro. Se desprende de esos resultados que la solución no vale por el peligro de ovalización estática que produce el desplazamiento del centro de gravedad de la masa almacenada.

Los ensayos hasta ahora descritos nos llevan a la conclusión de que la situación de la boca de salida y la forma del flujo de vaciado nos permiten predecir el tipo de sobrepresiones o depresiones que aparecerán en las paredes de los silos. En función de esos factores, el coeficiente de depresión o de sobrepresión varía desde 0,74 hasta 1,95, para cualquier altura de pared y relación altura-lado.

Pasar por alto el cálculo complejo a que obliga la estimación de las sobrepresiones implica exponerse a deformaciones y roturas de las paredes. De ahí que, para paliar o salir al paso de posibles errores de construcción, se haya procedido a colocar en muchos silos el llamado tubo de vaciado estático, que consiste en un tubo perforado introducido en el eje de la celda. Al abrirse la boca de salida, las partículas que se encuentran en el interior del tubo se ponen en movimiento e impiden la entrada de grano por los orificios inferiores, penetrando éste por la parte alta, y permaneciendo el material inmóvil en la celda; no se producían, pues, en teoría sobrepresiones de vaciado. Sin embargo, cuando yo realicé el proceso en maqueta con galgas extensométricas obtuve un coeficiente de sobrepresión de 1,35, lo que viene a comprobar que el tubo de vaciado estático no es el idóneo. Este sistema de ensilado no admite granos con impurezas y humedad, que lo convierten en cohesivos, bloqueando así en parte su penetración por los orificios del tubo y originándose un vaciado libre con deformaciones y roturas en las paredes de las celdas o cuerpos de los silos.

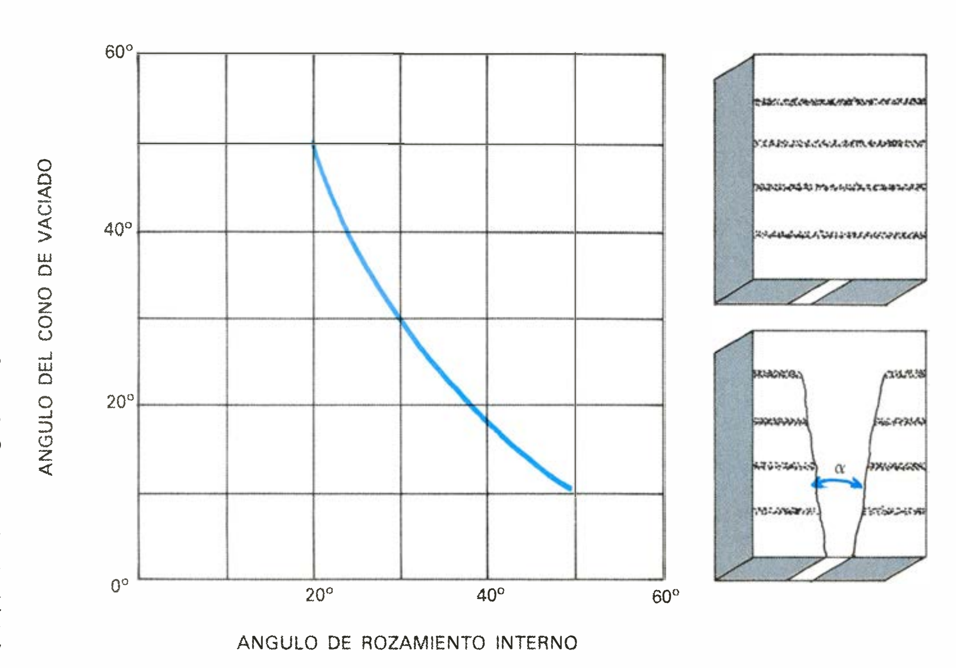
Método alternativo al uso de tubos de vaciado estático es el que opta por recurrir a las salidas múltiples. Se sitúan en el fondo del silo o tolva varias salidas simétricas que van a parar a un colector único. Se pretende conseguir con ello un flujo másico durante el vaciado de la celda: toda la masa descenderá uniformemente sin la aparición de conductos o chimeneas ni desmezcles en el grano almacenado. Queda así asegurada la calidad uniforme del producto elaborado, en los diferentes procesos industriales que sigan ulteriormente (panificación, cervecería, etcétera). Este sistema tiene el inconveniente de producir las más altas sobrepresiones durante el vaciado, del orden de 1,95.



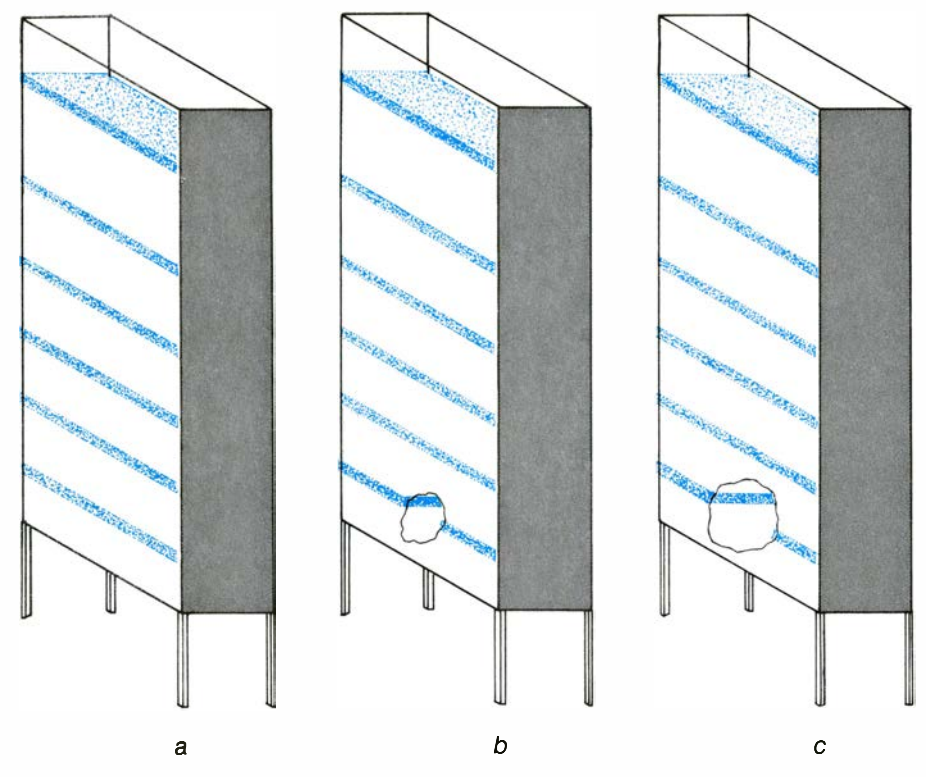

**MAQUETA DE FONDO PLANO,** dotada con salidas múltiples. En el fondo del silo o tolva se han abierto varias salidas simétricas que van a parar a un colector único. Se obtiene un flujo uniforme de vaciado, sin chimeneas o conductos y desmezcle. Las presiones laterales tienen un coeficiente de sobrepresión de 1,95.

Todo ello nos lleva a avanzar unas conclusiones provisionales relativas al diseño racional y construcción de silos, destinados a almacenar productos granulares. Conclusiones que he corroborado en mis propios ensayos, en los que el ángulo de rozamiento interno del material ensilado se hallaba comprendido entre 22 y 30 grados, que son los habituales en los trabajos de esta índole. En primer lugar, se determinarán las propiedades físicas del producto a almacenar, su densidad sobre todo, así como el ángulo de rozamiento interno y ángulo de rozamiento con la pared de la celda a construir. Atenderemos, luego, a la relación altura-lado y a la posición de la boca o bocas de salida, comprobando si se va a instalar un tubo de vaciado estático. Conocidos el comportamiento del material en el interior y el coeficiente de sobrepresión será fácil establecer entonces las hipótesis de cálculo que precise el diseño: presiones laterales sobre las paredes, presiones verticales sobre las tolvas y fuerzas de rozamiento en su valor mínimo (sin sobrepresiones) y en su valor máximo (con sobrepresiones). A modo de cautela final, se comprobarán posibles ovalizaciones debidas al vaciado excéntrico, en particular, cuando se trate de silos cilíndricos metálicos, ya que la falta de rigidez transversal ocasionará deformaciones graves.

¿Qué peculiaridades presentan los




**CUALQUIER MATERIAL** al fluir en el interior de una maqueta o silo real forma un cono de vaciado con un ángulo α (*derecha*), que depende del ángulo de rozamiento interno, cuya relación nos da el gráfico.




**MAQUETA DE FONDO PLANO,** con una relación altura-lado igual a 2,5 y vaciado centrado. El producto ensayado aquí es uno pulverulento o cohesivo. El proceso de vaciado se realiza a través de un conducto central, con formación de bóvedas estables que producen serias interrupciones en el flujo. Una vez vaciado el silo por gravedad, queda una importante cantidad de producto que se apoya en paredes y tolva.

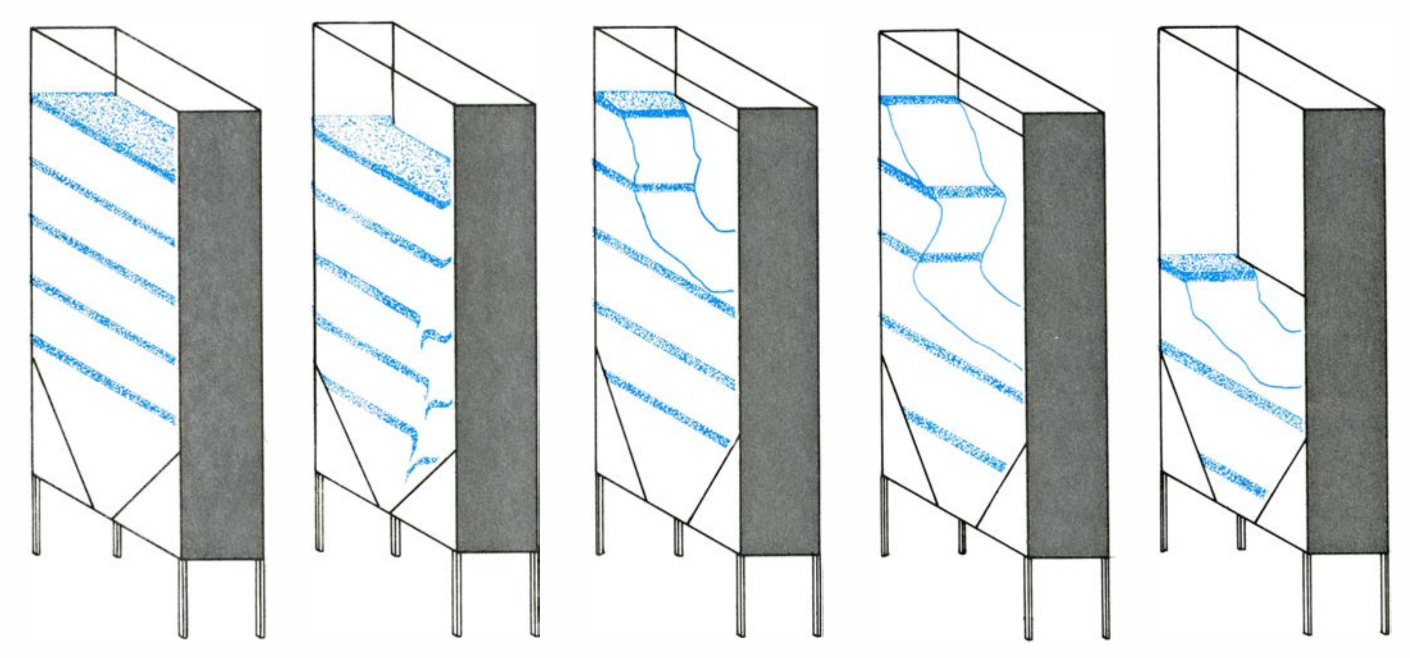
materiales pulverulentos? La mayoría de los procesos industriales precisan la molienda de productos granulares, cereales por ejemplo, para obtener mezclas heterogéneas muy finas. Estas tienen tendencia a aglutinarse debido a las fuerzas de cohesión que existen entre partículas.

Al iniciarse el vaciado de un silo se produce un cono invertido, cuyo ángulo próximo a la tolva, bauticémosle $\alpha$, depende del ángulo de rozamiento interno del producto almacenado. Cuanto mayor es el ángulo de rozamiento interno, menor es el ángulo $\alpha$ del cono invertido de vaciado. Para comprender con mayor claridad el comportamiento de estos productos, hemos recurrido también al ensayo con maquetas de caras transparentes. Vamos a reducir a tres casos significativos el dispositivo experimental.

En el primero, el producto ensayado es un cereal, cuyo ángulo de rozamiento interno es de 24 grados, y de 40 grados el ángulo $\alpha$ del cono invertido de vaciado. En el segundo ensayo, se experimentó con arroz troceado. Aquí el ángulo de rozamiento interno era de 50 grados; el cono de vaciado con un ángulo de 10 grados se reduce prácticamente a un tubo o conducto de vaciado. Por último, probamos con harina. A la extrema finura de las partículas había que agregar una nueva variable: la cohesión. Se formaba una chimenea de vaciado con arcos estables que interrumpían el proceso de expulsión.

El almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos complica el problema debido a que el material no fluye bien. Se hizo necesario ensayar en maquetas de caras transparentes para determinar el comportamiento de ese producto y obtener una geometría idónea de celda y tolva que posibilitara el vaciado. Las presiones correspondientes a la fase de llenado son idénticas a las obtenidas en el caso de productos granulares; no ocurre lo mismo con las correspondientes a la fase de vaciado. Se desconocían los coeficientes de sobrepresión que aparecerían en las paredes y que debían determinarse.

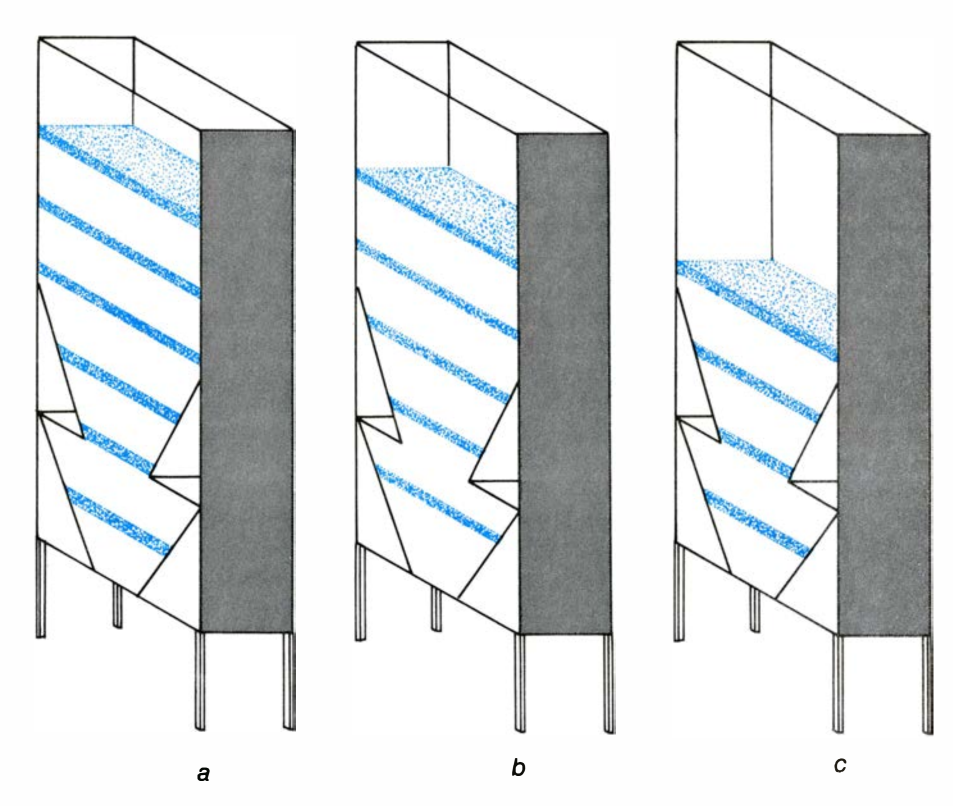
¿Cómo abordé el problema? Construí una maqueta de fondo plano y relación altura-lado igual a 2,5, con vaciado



**MAQUETA CON TOLVA** de 70 grados de pendiente. Vaciado centrado. Relación altura-lado igual a 2,5. Se ensayó con harinas que contenían en torno al 13 por ciento de humedad y un dos por ciento de grasas. Se forma un conducto de vaciado central que afecta aproximadamente al 35 por ciento del producto almacenado, permaneciendo el resto en reposo. La aparición de bóvedas, su posterior caída con la correspondiente inundación del conducto y boca de salida constituyen la tónica general del proceso. La pendiente de 70 grados permite un vaciado absoluto, sin restos en paredes y fondo. Las presiones laterales durante el vaciado alcanzaron un coeficiente de sobrepresión de 6, valor muy elevado si se compara con silos para productos granulares.

centrado. La dimensión en planta de la maqueta era de 177 milímetros de longitud por 85 milímetros de anchura. La boca de salida máxima medía 70 × 30 milímetros, aunque normalmente la abertura utilizada era de 30 × 30 milímetros. Se ensayó con pienso de avicultura que tenía un 13 por ciento de humedad y un 2 por ciento de grasa. Al abrirse la boca de salida se formaba una bóveda estable, justo encima de la boca de descarga; tenía que golpear la pared para que se desprendiera la bóveda, formándose una chimenea o tubo de vaciado central que alcanzaba la superficie superior del producto almacenado. El conducto o chimenea de vaciado que se formaba en el interior del silo se alimentaba de producto procedente de la superficie. Se precipitaban avalanchas sobre dicho conducto, que lo obturaban y lo compactaban, aumentando la cohesión del producto, y daban origen a bóvedas estables. Para romperlas, debía volver a golpear las paredes.

Una vez vaciado, por gravedad, el silo, y tras haberse producido serias interrupciones del flujo de vaciado, quedaba una importante cantidad de material que se apoyaba en el fondo y pared de la celda. El ángulo que formaba la superficie libre de la sustancia retenida con la horizontal era muy superior al del talud natural.




**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE VACIADO fundado en tolva y contratolva, ideado por el autor. La tolva superior permite un vaciado uniforme ya que la dimensión de la boca de salida es tan grande que no cabe la aparición de bóvedas sobre la misma. Al pasar el material a la tolva inferior, se produce una expansión con pérdida de presión, y así el material almacenado, suelto, fluye por la boca de salida.**

Diseñé una maqueta alternativa, con las siguientes características: tolva formando un ángulo de 70 grados con la pared, vaciado centrado y relación altura-lado igual a 2,5. Al iniciarse el vaciado aparecía una bóveda sobre la boca de salida. El derrumbamiento de la bóveda ponía en movimiento el 35 por ciento del producto almacenado, permaneciendo el resto en reposo. La chimenea de vaciado era aquí más amplia que la producida en el ensayo de fondo plano. Se contabilizaron 5 bóvedas estables sobre la boca de salida, con las correspondientes caídas y derrumbamientos de la masa almacenada.

Con la pendiente de 70 grados en la tolva, el silo se vaciaba por completo, sin que paredes ni tolva retuvieran residuos. Por lo que concernía a las presiones laterales, el coeficiente de sobrepresión durante el vaciado alcanzó el valor 6.

¿Qué enseñanzas cabe deducir de esas maquetas? El empleo de sistemas tradicionales de vaciado con tolvas a 70 grados y bocas de salida normalizadas con dimensiones máximas de 500 milímetros por 500 milímetros, o alargadas, conduce a la formación de bóvedas con interrupciones en el flujo de vaciado, que producen desmezcles importantes si se trata de una mezcla heterogénea de productos. Las interrupciones en el flujo de vaciado reducen, asimismo, el rendimiento de la instalación hasta hacerla inservible. Aproximadamente el 90 por ciento de las instalaciones que se diseñan en el mundo presentan serios problemas de flujo de vaciado. La solución adoptada es la de golpear las tolvas, lo que no impide que queden residuos de material en paredes y fondo, con la consiguiente mengua de la capacidad real de almacenamiento y la producción de contaminaciones a medio y largo plazo.

Para solucionar todos esos problemas –formación de bóvedas, desmezcle y retención de residuos–, el autor ha experimentado en maquetas y silos reales un método que se ha mostrado válido: diseñar un dispositivo de vaciado a base de tolva y contratolva. La tolva superior permite un vaciado uniforme, ya que la dimensión de la boca de salida es tan grande que no cabe la formación de bóvedas por encima de ella. Al pasar el material almacenado a la tolva inferior, se produce una expansión con pérdida de presión, por lo que el producto, al estar suelto, fluye por la boca de salida inferior, construida de acuerdo con las medidas estándar.

Resumiendo. A la hora de diseñar un silo, el ingeniero tendrá que prestar atención, primero, al tipo de productos a almacenar: granulares o pulverulentos. Deberá conocer el comportamiento del sólido en cuestión y acomodar la estructura al mismo. En el caso de productos granulares, lo ideal sería diseñar un silo con salidas múltiples y aplicar coeficientes de sobrepresión entre 2 y 2,32. La razón de que sean pocas las estructuras así construidas obedece, ignorancia aparte, al mayor coste de la instalación, al exigirse más espesor en paredes y tolvas. En el caso de materiales pulverulentos cohesivos, los problemas son mucho más serios: las bóvedas que aparecen y su posterior caída originan sobrepresiones de hasta 5, es decir, más del doble del postulado para productos granulares. Se trata de unas dificultades no resueltas todavía por ningún silo en funcionamiento. En el trabajo de investigación que estoy llevando a cabo con C. Calil, de la Universidad de São Paulo, hemos llegado a las siguientes conclusiones provisionales: el diseño de un silo destinado a almacenar productos pulverulentos cohesivos precisa disponer de una boca de salida lo suficientemente grande que evite las bóvedas del sólido guardado, tolvas con bastante inclinación para que el producto se deslice con facilidad hacia la boca de salida y paredes rugosas para que la presión sobre la base sea pequeña.

# Temas metamágicos

## *Dos clases de indagación: la del "National Enquirer" y la de "The Skeptical Inquirer"*

Douglas R. Hofstadter

"EL MUCHACHO VE CON LAS OREJAS... declaran perplejos maestros e investigadores"

"Híbridos de persona y planta... LOS CIENTÍFICOS ESTÁN A PUNTO DE CREAR PERSONAS VEGETALES... Increíbles criaturas capaces de cuanto quisiéramos"

"La hipnosis lo revela: un SER EXTRATERRESTRE COMPARTE CUERPO Y MENTE DE UNA MUJER"

–Titulares del *National Enquirer*

El niño que el lector ha sido, ¿se preguntó alguna vez por qué en los tebeos las frases declarativas acaban muchas veces con signos de admiración? ¿Eran en verdad tan asombrosos sus enunciados? ¿Tan excitados estaban siempre los personajes que las decían? Es evidente que no. Aquellos signos de admiración eran un ardid psicológico, sin otra finalidad que dar más garra a la historieta.

El *National Enquirer*, una de las instituciones periodísticas más amarillas y sensacionalistas de los Estados Unidos, se vale de una treta similar. Siempre que uno de sus titulares lanza a los cuatro vientos el descubrimiento de algún fenómeno extravagante o increíble, del que jamás nadie tuvo noticia, en lugar de encerrarlo entre admiraciones le da comienzo (o fin) mencionando "la perplejidad de los científicos", "la confusión de los investigadores" o la sorpresa de otros sabios no menos atónitos. Se trata de un adorno, puesto allí para darle credibilidad al reportaje.

¿O tal vez no? ¿Cuál es el verdadero objetivo de sus redactores? ¿Que la historieta parezca verosímil o que parezca increíble? Tal vez pretendan lograr ambas cosas: que por una parte la noticia suene lo más estrafalaria y exótica posible, y que por otra tenga aspecto respetable y auténtico. Para lograr un titular ideal les es forzoso implantar en él una contradicción: la imposibilidad de la mano de la certidumbre. En dos palabras: disparates comprobados.

¿Qué podemos deducir de titulares como los de arriba? ¿Qué consecuencias extraer de que esta publicación se venda por millones todas las semanas en tiendas de alimentación y supermercados, de que la gente engulla tan vorazmente sus historietas como las bolsas de patatas fritas? ¿Y del hecho de que una vez terminada puedan volverse hacia más montañas de otros disparates con que nutrir su mente: *National Examiner, Star, Globe, Weekly World News*,...? ¿Qué opina usted? Homólogos en castellano no faltan.

Seguramente su primera reacción sea encogerse de hombros, y dejar de lado, por absurdas, semejantes historias. Pero, ¿cómo sabe usted que son absurdas? ¿Le parece a usted que también *ésta* es una pregunta tonta? ¿Qué opina entonces de los artículos publicados en esta revista? ¿Les presta usted atención y confianza? ¿Y qué diferencia hay entre unos y otros? ¿Será únicamente un estilo editorial distinto? ¿Tal vez sea el formato, tal vez el tono sensacionalista y la concisión del texto, la profusión de fotos en color de personajes y personajillos lo que le haga desconfiar del *National Enquirer*? Aunque, espere un momento. ¿No hay aquí una petición de principio? ¿Qué clase de razonamiento estamos haciendo si entre las pruebas de la acusación incluimos el veredicto de culpabilidad? Es obvio que precisamos de un procedimiento para decidir objetivamente qué sea "prensa sensacionalista".

¿Y cuál es la otra cara de la moneda? ¿Es acaso el formato tradicional y digno de *Investigación y Ciencia*, su tono mesurado y objetivo, la ausencia de famosos entre sus páginas lo que le convence de su credibilidad? De ser así, tiene usted un curioso método para discernir lo verdadero de lo falso. Da la impresión de que su concepto de "verdad" está fuertemente ligado a sus criterios –o a sus prejuicios– de valoración del "estilo" del canal de comunicación. Algo verdaderamente intangible.

Dicho esto, tengo que admitir que yo recurro continuamente a rápidas valoraciones de estilo al tratar de cribar lo verdadero de entre lo falso, de discriminar lo verosímil de lo increíble. Me sería imposible explicar en qué criterios me baso al hacerlo así sin antes pensarlo largamente y sin escribir buen número de cuartilas. E incluso entonces, si tuviera que publicar una guía definitiva (que bien pudiera titularse *La discriminación de lo verdadero de lo falso atendiendo a su estilo de publicación*), de nada serviría sin editarla e imprimirla, y su título, por no hablar del estilo con que estuviera escrita, aunque tal vez atrajera algunos lectores, sin duda provocaría la repulsión de muchos más.

Siendo la verdad tan escurridiza, no es de extrañar que la gente se encuentre acosada y asediada por la algarabía de voces que desde la letra impresa le lanzan mensajes contradictorios. En años más mozos creí durante un tiempo que una vez algo había sido descubierto, verificado y publicado pasaba a ser Conocimiento: definitivo, aceptado e irrevocable.

Para sorpresa mía, sin embargo, descubrí pronto que la verdad ha de estar constantemente luchando en defensa de su vida. Que el haber sido publicada una idea en una revista prestigiosa no garantiza que se conozca y acepte. En realidad, por lo común será necesario volver a presentarla y publicarla muchas veces, con palabras nuevas y en formas distintas, y generalmente por otras personas, antes de que tenga la oportunidad de prender. Tal descubrimiento no resulta grato a mentalidades idealistas, como la mía, más dispuestas a creer en la noción de verdad monolítica y absoluta que a admitir la existencia de verdades plurales y relativas. La idea de que la verdad haya de luchar por su supervivencia resulta bien triste; y la idea de que la verdad *no* llegará a emerger sin fuerte ayuda me parece todavía más indignante.

Todas las sociedades se han planteado esta cuestión: ¿Qué es mejor, dejar alzarse todas las voces, cada una proclamando su verdad, en conflicto con las demás, o tener únicamente unas cuantas publicaciones "oficiales" que dicten en cada caso qué es válido y qué no lo es? Nuestra sociedad ha optado por la pluralidad de voces, por el libre y completo enfrentamiento de teorías contrapuestas. Ahora bien, en medio de tumulto semejante, ¿nadie velará por la ley y el orden? ¿Quién será guardián de la verdad? La respuesta es: ¡el CSICOP!

¿El CSICOP? ¿Qué significa CSICOP? ¿Será algo así como un policía que guarde la verdad? No le falta mucho.

CSICOP son las siglas del Committee for the Scientific Investigation of Claims of the Paranormal (Comité para investigar científicamente lo paranormal). Un título francamente esotérico para una organización cuyos fines nada tienen de esotéricos: aplicar el sentido común a las informaciones de hallazgos extravagantes, de hechos implausibles, de teorías inverosímiles.

¿Quiénes son los miembros del CSICOP, y por qué se han reunido? La organización nació en la mente de Paul Kurtz, profesor de filosofía de la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo, quien le dio el ser, convencido de la necesidad de oponerse a la creciente marea de creencias irracionales y de proporcionar al público una exposición más ponderada de lo paranormal, presentando el punto de vista científico disconforme. Entre los primeros miembros del CSICOP se encontraban algunos de los más distinguidos filósofos (por ejemplo, Ernest Nagel y W. V. Quine) y otros pintorescos enemigos del oscurantismo, como el psicólogo Ray Hyman, el ilusionista James Randi y alguien de quien los lectores de esta sección es seguro tienen noticia: Martin Gardner. Ya en las primeras reuniones del comité se decidió que su principal función fuera publicar una revista dedicada al sutil arte del desprestigio. Tal vez no fuera "desprestigio" la palabra que ellos hubieran elegido, pero creo que es la adecuada. La revista, que empezaron a publicar en otoño de 1976, fue *The Zetetic*, del griego "indagador escéptico"

Como en tantos otros proyectos de altos vuelos, en el momento de echar plumas se planteó un conflicto filosófico entre dos facciones, una "relativista", no enjuiciadora; otra, más firmemente contraria al disparate y la superchería, más ansiosa de ir a la ofensiva y atacar lo presuntamente sobrenatural. Aunque suene extraño, la facción más tolerante no lo fue tanto como para aceptar el punto de vista contrario, y la brecha se abrió más todavía. Finalmente, se produjo el cisma. La facción relativista (un miembro) optó por publicar su propia revista, *The Zetetic Scholar*, donde coexisten felices ciencia y pseudo-ciencia. La más numerosa conservó el nombre CSICOP, y cambió el título de su publicación por *The Skeptical Inquirer*.

El propósito de *The Skeptical Inquirer* es, sencillamente, luchar contra el disparate. Recurre para ello al sentido común, lo que significa que es accesible a todos cuantos sepan leer. Para comprenderla no se requieren conocimientos particulares ni estudios superiores; en sus páginas los disparates quedan sistemáticamente reducidos a polvo. (No siempre los desatinos son aparatosamente absurdos, como los titulares del comienzo del artículo; los hay de gran sutileza.) Lo único que se precisa para leer esta indómita revista es curiosidad por la naturaleza de la verdad; curiosidad por saber cómo la verdad se defiende a sí misma (con la ayuda de su agente, el CSICOP) de los ataques que desde todos los frentes le dirigen teorizadores de inimaginable imaginación, especuladores de toda laya, excéntricos, lunáticos y descarados impostores.

La revista ha ido creciendo desde el pequeño número de suscriptores inicial hasta unos 7500; un David en comparación con los Goliats mencionados, cuya circulación semanal es de millones. Sus páginas son de tal vivacidad y humor, que en ellas el combate de las ideas cobra sus más gratas formas. La revista no es en modo alguno portavoz de una creencia monolítica, ni paladín de un único dogma. Es, por el contrario, un foro de ideas. Porque incluso los más duchos en esgrimir el sentido común pueden hacerlo en formas distintas y, en ocasiones, estar en desacuerdo.

En una revista así, las decisiones de política editorial tendrán siempre un elemento paradójico. Después de todo, el tema a debate es, en esencia, la naturaleza de un razonamiento correcto. ¿Cuáles deberán ser aceptados como tales, y cuáles no? Para caricaturizar la situación, imaginemos los dilemas de tipo editorial con que habrían de enfrentarse hipotéticas publicaciones tituladas *Boletín de la prensa libre, Mente abierta* o *Información sobre política editorial*. ¿Qué cartas al director deberían publicarse? ¿Qué artículos? ¿Qué argumentos aducir para justificar la aparición o supresión de parte del material presentado?

No es fácil responder a estas preguntas, pues en todas ellas hay una paradoja, una ambigüedad, al ser las ideas sometidas a evaluación las mismas encargadas de efectuarla. La única salida es apelar al sentido común, roca firme que sustenta toda racionalidad. Desdichadamente, carecemos de un algoritmo que inexorablemente caracterice de modo único este estrato último de la razón, ni es verosímil que pueda disponerse pronto de nada semejante. Por ahora, el núcleo de la racionalidad tiene que depender de inescrutables: lo sencillo, lo elegante, lo intuitivo. Esta paradoja ha pervivido a lo largo de la historia del pensamiento, mas en nuestros tiempos, exuberantes en informaciones, parece especialmente perturbadora.

A pesar de tales rompecabezas epistemológicos, que guardan relación con la razón misma de su existencia, *The Skeptical Inquirer* está floreciendo y proporcionando refrescante antídoto contra las publicaciones científicas, cada vez más henchidas de jerigonza técnica, y que tantas veces nos resultan curiosamente intrascendentes, al lado de la vida ordinaria. En este aspecto, el *Inquirer* llega a recordarnos las publicaciones sensacionalistas de la prensa amarilla.

La relación de temas tratados en los 17 números hasta ahora publicados es notablemente variada. Algunos de ellos han sido tratados solamente una vez; otros se repiten con cierta frecuencia, y son examinados desde distintos ángulos y analizados a distinta profundidad. Algunos de los más frecuentes son la PES (percepción extrasensorial), la telecinesis (capacidad para influir en sucesos distantes mediante las fuerzas de la mente), la astrología, los biorritmos, el monstruo del lago Ness, los ovnis, el creacionismo, la telepatía, la televidencia, la clarividencia detectivesca, el triángulo de las Bermudas (y otros), la "mentalografía" (capacidad para impresionar una película fotográfica por acción del pensamiento), el presunto origen extraterrestre de la vida terrena, el hechicero "Don Juan" de Carlos Castañeda, la fuerza de las pirámides, la cirugía psíquica y la cicatrización de heridas por la fe, la "cienciología", las predicciones de "psiquistas" famosos, los fantasmas, espíritus y casas encantadas, la levitación, la quiromancia y la lectura del pensamiento, las teorías antropológicas heterodoxas, la percepción de las plantas, las máquinas de movimiento continuo, la radiestesia... Y estos no son sus únicos temas, sino los más frecuentes.

Algunos de sus colaboradores intervienen muchas veces, como Randi, que es verdaderamente prolífico. Entre otros encontramos al especialista en aeronáutica Philip J. Klass, al experto en ovnis James E. Oberg, al afamado Isaac Asimov, al fundador del CSICOP (y su actual presidente) Kurtz, al psicólogo James E. Alcock, al pedagogo Elmer Kral, el antropólogo Laurie Godfrey, al redactor científico Robert Sheaffer, al sociólogo William Sims Bainbridge y a muchos otros. El redactor jefe de la revista, Kendrick Frazier, que escribe por libre sobre temas científicos, publica periódicamente comentarios tan elocuentes como mordaces.

No hay mejor manera de mostrar el

tono de la revista que entresacar de sus artículos unas cuantas muestras. Uno de mis favoritos apareció en el segundo número (primavera/verano de 1977). Debido al psicólogo Ray Hyman (quien, incidentalmente, lo mismo que otros varios colaboradores de *The Skeptical Inquirer*, es también ilusionista de talento) se titula " 'Cold Reading': How to Convince Strangers that You Know All about Them". " 'La lectura en frío': Un método para convencer a desconocidos de que sabemos todo lo referente a ellos.")

El artículo comienza comentando un curso que Hyman impartió sobre distintos métodos de manipulación de la conducta de las gentes. Escribe: "Invité a varios de estos manipuladores, vendedores ambulantes, promotores de enciclopedias, hipnotizadores, técnicos publicitarios, predicadores, timadores y diversos individuos que han de habérselas con las personas y sus problemas. Las técnicas que examinamos y, de modo particular, las destinadas a ayudar a la gente a apechar con sus problemas personales, parecían valerse de la tendencia del cliente a ver en una cierta situación más de lo que en realidad ésta contiene. Al serles indicada esta explicación, los alumnos la aceptaron sin discusión. Mas yo no estaba convencido de que hubieran comprendido plenamente cuán tenaz y poderosa es la tendencia del ser humano a buscar explicación y sentido al absurdo y al disparate".

Seguidamente, Hyman expone lo muy dispuestas que las personas estamos para creer lo que otros nos dicen de nosotros. Su "regla áurea" es: "Para caerle simpático a tu prójimo dile lo que está deseando escuchar. Su deseo es oír hablar de sí mismo, así que háblale de sí mismo. Pero no le digas lo que tú sabes ciertamente de él. ¡Oh, no! Nunca le digas la verdad. Dile en cambio lo que a él le gustaría que fuera cierto". A modo de ejemplo, Hyman cita el siguiente párrafo (que, por notable coincidencia, fue escrito pensando precisamente en *usted*, querido lector):

"Algunas de sus aspiraciones tienden a ser muy poco realistas. En ocasiones es usted extrovertido, afable y sociable, mientras en otras se torna introvertido, belicoso y reservado. Ya ha descubierto usted que ser demasiado franco al mostrarse a otros no es prudente. Se enorgullece usted de pensar por sí mismo, con independencia, y de no aceptar sin pruebas adecuadas las opiniones de otros. Le gusta cierto grado de cambio y variedad; le molestan en cambio las restricciones y limitaciones que le coartan. En ocasiones le asaltan serias dudas de si habrá tomado la decisión oportuna o realizado lo que era conveniente. Aunque exteriormente es disciplinado y dueño de sí, en su fuero interno usted se sabe inseguro y propenso a inquietarse.

"El ajuste de su sexualidad le ha presentado ciertas dificultades. Aunque su personalidad presenta algunos puntos flacos, por lo común es usted capaz de compensarlos. Tiene usted grandes capacidades que aún no ha utilizado y a las que todavía no ha sabido sacar provecho. Tiene tendencia a ser duro crítico de sí mismo y fuerte necesidad de gustar y causar admiración en otras personas."

¿Qué tal le cae el traje? ¿Bien, verdad? Hyman comenta: "Todo cuanto se dice en este rollo macabeo fue utilizado ya en 1948 por Bertram Forer para poner de relieve en una de sus clases el fenómeno de 'validación personal'. Casi todas las afirmaciones que en él se hacen fueron tomadas de un libro de

astrología de venta en kioskos. Los alumnos de Forer, pensando que el esbozo de personalidad expuesto había sido preparado individualmente para cada uno de ellos como resultado de un test caracteriológico, le dieron nota media de 4,26 en una escala que iba de 0 (malo) a 5 (perfecto). No menos de 16 de sus 39 alumnos (el 41 por ciento) estimaron que describía de forma perfecta su personalidad. Solamente 5 le dieron calificaciones inferiores a 4 (siendo la mínima un 2, que significaba 'pasable'). Casi 30 años después, los alumnos le dan al mismo bosquejo calificaciones casi idénticas, convencidos de que se trata de descripciones únicamente de sí mismos".

Hyman da una receta de 13 puntos para lograr ser "lector frío". Entre sus indicaciones se encuentran éstas: "Válgase de la técnica del 'anzuelo' (hacer que el sujeto nos hable de sí mismo y luego repetírselo con otras palabras); dé siempre la impresión de que sabe usted más de lo que está diciendo; no tenga reparo en adular a su sujeto siempre que tenga ocasión". Esta receta tan deliciosamente cínica es presentada con todo lujo de pormenores, presumiblemente no con la intención de hacer de los lectores charlatanes o aduladores interesados, sino para vacunarles contra tales manipulaciones.

Hyman pregunta: "¿Por qué funciona tan bien esta receta? De nada vale decir que la gente es sugestionable o incauta. Tampoco podemos dejarla de lado con el argumento de que ciertos individuos carecen de sentido crítico o inteligencia suficientes para ver un poco más allá de cuanto se les dice. Más aún, podría decirse que sin una cierta inteligencia en el cliente la 'lectura' no funcionaría bien... Para comprender nuestro mundo es forzoso que pongamos en juego nuestro conocimiento y nuestras expectativas. En casi todas las situaciones ordinarias, esta forma de valernos de la memoria y del contexto nos permite interpretar correctamente lo que se nos dice, y nos proporciona las inferencias necesarias para ello. Pero este poderoso mecanismo puede muy bien despistarnos en situaciones que no aporten verdaderamente mensaje alguno. En lugar de percibirlas como 'ruido aleatorio', somos capaces todavía de encontrarle un sentido a la situación. Y así, el mismo sistema que de forma creativa nos permite hallar significados y hacer nuevos descubrimientos nos convierte también en sumamente vulnerables a la explotación de manipuladores de toda laya. En el caso de la lectura en frío, el manipulador puede tener conciencia clara del engaño que practica, mas no pocas veces también él es víctima de la validación personal".

(Hyman sabe bien de qué habla. Hace muchos años, él mismo estuvo convencido de poseer auténtica capacidad quiromántica, hasta que un día hizo la prueba de decirle a la gente exactamente lo contrario de cuanto creía ver en las rayas de sus manos, descubriendo que se tragaban el cuento con la misma convicción de siempre. Comenzó entonces a sospechar que la plasticidad de la mente humana –y en particular, la suya– estaba jugando algunas malas pasadas.)

Al comienzo de cada número de *The Skeptical Inquirer* hallamos la sección de "Noticias y Comentarios". Se tratan en ella las últimas informaciones sobre hallazgos sensacionales de actualidad, los espacios televisivos dedicados a debatir o informar (en favor o en contra) lo paranormal, querellas judiciales de uno u otro signo, etcétera. Una de las secciones más divertidas (otoño de

1980) fue la reseña de la concesión de los "Premios Uri Geller" que Randi adjudicó a diversas almas que bien lo merecían, vistos sus meritorios esfuerzos por arraigar entre nosotros la candidez, la superchería y la creencia en lo irracional. Los premios habrían de entregarse, como es obvio, el Día de los Inocentes. Cada premio consistía en "una cuchara de acero inoxidable doblada con el mejor gusto, con una base muy transparente y muy endeble". Los ganadores recibieron telepáticamente la notificación del premio, "siendo libres de anunciar su premio antes del acto de entrega, por precognición, si así lo deseaban". Los premios se agrupaban en cuatro categorías: Académica ("para el científico que haya dicho la mayor bobada sobre parapsicología"), Financiación ("a la fundación u organización que haya concedido más dinero para las investigaciones parapsicológicas más necias"), Actuación ("para el psiquista que con mínimo talento haya sido capaz de tomarle el pelo a más gente") y Medios de Comunicación ("a la organización informativa que respalde las más descabelladas afirmaciones de los paranormalistas").

La naturaleza de las coincidencias es tema recurrente en el análisis de lo paranormal. Recuerdo vívidamente un pasaje de un precioso libro de Warren Weaver, titulado *Lady Luck: The Theory of Probability*, donde hace notar que en muchas situaciones el resultado más probable puede muy bien ser un suceso sumamente inverosímil (como ocurre al repartir manos de bridge, donde cualquiera que sea la mano que se reciba, por necesidad, será extraordinariamente rara). Una tesis semejante aparece en la siguiente cita, tomada de un libro reciente de David Marks y Richard Kamman, *The Psychology of the Psychic* (del que fueron espigadas varias citas en un número de *The Skeptical Inquirer*):

"Primero: nos fijamos en las coincidencias, particularmente en las más llamativas, y por ello las recordamos. Segundo: no nos fijamos en las no-coincidencias. Tercero: nuestra ceguera para las no-coincidencias crea la *ilusión a corto plazo*, que hace parecer inverosímiles e inexplicables las coincidencias más llamativas. Cuarto: no somos duchos en el cálculo de combinaciones de sucesos (y por tanto no percibimos las correspondientes probabilidades). Quinto: pasamos por alto el *principio de equivalencia* de las coincidencias, a saber, que cualquiera de ellas es tan buena como cualquier otra en lo que a teoría del psiquismo se refiere."

Tenemos excelentes ejemplos de la incapacidad de la gente para detectar no-acontecimientos en las predicciones fallidas de afamados videntes y psiquistas (como, por ejemplo, en Estados Unidos, Jeane Dixon). Casi nadie se para a comprobar la frecuencia con que los sucesos reales invalidan las predicciones. *The Skeptical Inquirer* tiene la tradición de repasarlas y comprobarlas. Al fin de cada año publica cierto número de predicciones correspondientes a él realizadas por distintos psiquistas, y después determina su índice de aciertos. En el número de otoño de 1980, la redacción tomó las profecías de los "100 principales", las tabuló, disponiendo las doce primeras según el número de videntes que las predijeron; a cargo del lector quedaba la constatación del acierto en la visión del futuro por medios psíquicos. La predicción que encabezaba la lista de 1979 (profetizada por 86 psiquistas) fue: "Casi todo el mundo podrá disfrutar de más larga vida conforme vaya dominándose el proceso de envejecimiento". La segunda (85 psiquistas) resultó: "Se producirán avances de la mayor importancia en la lucha contra el cáncer, que casi harán desaparecer la enfermedad". La tercera (también 85): "Tendrá lugar un asombroso renacimiento espiritual, con retorno a los viejos valores". En este tono prosiguen. La sexta predicción (81 profetas) fue: "Se establecerá contacto con seres extraterrestres, que nos darán conocimientos increíbles".

Estas predicciones tienen algo de patético, de desesperado incluso. Saltan demasiado a la vista las semejanzas entre las publicaciones que lanzan semejantes predicciones y series de televisión tan intrascendentes e inanes como "La Isla de la Fantasía" o "Star Trek" (que en España se tituló "Espacio 1999"). Su común denominador es la huida de la realidad. Esta tesis está bien sustentada en un artículo de William Sims Bainbridge, en el *Skeptical* de otoño de 1979. Seguramente que todos nosotros sentimos el deseo de diluir la realidad con un poco de fantasía, de lograr que la realidad parezca más sencilla, más en línea con lo que desearíamos que fuese. Empero, seguramente también todos nosotros tengamos la capacidad, e incluso el deseo, de discernir lo relevante de lo absurdo, o al menos así es cuando la diferencia se presenta de forma apremiante.

Mas, ¿cómo hacerlo? En la sección de noticias y comentarios del número de primavera de 1980 de *The Skeptical Inquirer* se daba cuenta de una animada serie de charlas-espectáculo, itinerantes, a cargo del "Capitán Rayo de Luz", pseudónimo de Douglas F. Stalker, profesor de filosofía de la Universidad de Delaware. El artículo pone lo siguiente en boca de Stalker, dentro de su espectáculo de "ridiculización cómica", que apunta contra la astrología, los biorritmos, la numerología, los ovnis, la fuerza de las pirámides, las potencias psíquicas y demás:

"Durante años estuve enseñando y explicando su falsedad en tono serio, cargando frontalmente contra tan descabelladas teorías. Este ataque directo no logró cambiar demasiadas mentalidades, y por ello decidí tomar una vía indirecta. Si no puedes vencerlos, únete a ellos. Y en cierta forma podría decirse que así lo hice. Construí por mi cuenta unas cuantas pseudo-ciencias absolutamente ridículas, e hice ver que no tenían menos base que la astrología y las demás. Expliqué también cómo construir otras de estas absurdas historias. Volviendo las cosas del revés, trabajando, por así decirlo, de dentro afuera, creo que muchos más alumnos alcanzaron a ver cuán pseudo son estas pseudo-ciencias... y ese es el auditorio al que deseo llegar... al grupo de ciudadanos del futuro inmediato. Mi espectáculo se dirige a ellos por la vía adecuada. Deja impresión duradera. Nos hace ganar amigos y cambiar mentalidades."

Una de las tesis que Stalker enuncia lúcidamente es que por muy elocuente que una conferencia pueda ser, nunca tendrá el poder de convicción de la propia experiencia. Esta idea ha sido bien elaborada en un estudio clásico, llevado a cabo por Barry Singer y Victor A. Benassi, del departamento de psicología de la Universidad estatal de California en Long Beach. Estos investigadores se propusieron establecer qué efecto causaban sobre los estudiantes de primer año de psicología ciertos fenómenos aparentemente paranormales, creados por un mago ataviado de forma exótica. De sus hallazgos se da cuenta en el número de invierno de 1980/81 de *The Skeptical Inquirer*, en un artículo titulado "Fooling Some of the People All of the Time" (Algunos se dejan engañar hasta el fin).

En dos de los grupos de estudiantes, el ilusionista (Craig Reynolds) fue presentado como alumno de segundo ciclo, "interesado por los aspectos psicológicos de lo paranormal y por las fuerzas de la psique, [que ha estado] trabajando para desarrollar la manifestación de sus potencias psíquicas". El profesor encargado del grupo declaró explícitamente: "Personalmente, no estoy convencido de las facultades psíqui-

cas de Craig, ni de las de nadie". En otros dos grupos, Craig fue presentado como estudiante de segundo ciclo, "interesado por los aspectos psicológicos de la magia y el ilusionismo escénico, [que ha estado] trabajando para poner a punto la representación de sus trucos". Los autores subrayan que todos los trucos realizados por Craig fueron "trucos sencillos, de nivel de aficionado, conocidos desde hace siglos y, muchos, explicados incluso en manuales de ilusionismo para niños".

Tras la actuación de Craig se les pidió a los alumnos que informaran por escrito de cuáles fueron sus reacciones. Singer y Benassi recibieron de su lectura dos fuertes sacudidas: "Primero... tanto en los grupos donde fue presentado como 'psiquista' como donde se le presentó como 'ilusionista', alrededor de dos terceras partes del alumnado creía firmemente que Craig gozaba de facultades psíquicas. Tan sólo unos cuantos alumnos parecían creer la descripción de 'ilusionista' dada por el profesor en las clases donde fue presentado como tal. En segundo lugar, no sólo prevalecía la convicción en los poderes sobrenaturales de Craig, sino que tal convicción era intensa y cargada de emociones. Cierto número de alumnos cubrió sus folios de exorcismos y exhortaciones contra el Diablo. Con respecto a su propio estado emocional, el 18 por ciento de los alumnos manifestó haber sentido miedo y sobresalto. La mayoría expresaron asombro y temerosa admiración.

"Estuvimos presentes en dos de las actuaciones de Craig, y fuimos testigos de ciertas formas extremas de conducta. Cuando Craig iba a medio camino de la salmodia para 'inducir la flexión' (parte de un truco consistente en doblar una barra de acero inoxidable) la clase se encontraba en estado de tensión y excitación terrible. Los alumnos permanecían tiesos en sus asientos, con los ojos brillantes y la boca entreabierta, muchos coreando en voz baja el cántico. Cuando al fin la barra se dobló hubo respingos de sorpresa y murmullos admirativos. Terminada la clase, su conducta típica fue permanecer inmóviles en sus asientos, con la mirada vacua o negando, perplejos, con la cabeza; otros, agolpándose en torno a Craig, pidiéndole que les explicara cómo alcanzar tales poderes. Teníamos la impresión de estar observando un efecto conductual de fuerza extraordinaria. Si al terminar su actuación Craig llega a pedir a los estudiantes que se arrancasen las ropas, que le lanzasen dinero, o que fundasen un nuevo culto, estamos convencidos de que algunos hubieran respondido entusiasmados. Evidentemente, algo sucedía allí que no comprendíamos del todo."

Después de tan dramática representación, se les dijo a las distintas clases que tan sólo habían visto unos cuantos trucos. De hecho, se les dio a dos clases más la misma representación, con el aviso adicional de que "en su actuación, Craig fingiría leer el pensamiento y poseer facultades psíquicas sobrenaturales, pero que, en realidad, Craig carece de ellas, y lo único que presenciarán serán trucos". A pesar del preaviso, más de la mitad de los alumnos de estas clases terminaron convencidos de que Craig tenía poderes psíquicos. "Algo nos dice esto", observan filosóficamente Singer y Benassi, "bien acerca de la consideración que merecen a sus alumnos los profesores de universidad, bien sobre las extrañas vías por las que la gente llega a creer en lo sobrenatural y lo oculto."

Viene ahora algo verdaderamente estupefaciente. "La pregunta que a continuación se les formuló fue si creían que un mago profesional podría repetir exactamente lo que Craig había

hecho. Prácticamente todos los estudiantes concedieron que así sería. Se les preguntó entonces si deseaban revisar su valoración sobre las facultades psíquicas de Craig, a la luz de la información negativa que ellos mismos habían aportado. Tan sólo unos cuantos lo hicieron, reduciendo el porcentaje de convencidos en el psiquismo de Craig al 55 por ciento."

"Seguidamente se pidió a los alumnos que estimasen la proporción de cuántos, declarándose psiquistas y realizando prodigios como los de Craig, serían en realidad embaucadores y falsarios que se valdrían de trucos de ilusionismo. Hubo acuerdo en que al menos tres de cada cuatro psiquistas serían, efectivamente, embaucadores. Tras emitir este juicio negativo, volvió a preguntárseles si estaban dispuestos a revisar su estimación de las capacidades psíquicas de Craig. Como antes, tan sólo unos cuantos se avinieron a ello, rebajando la proporción de convencidos al 52 por ciento."

Singer y Benassi se hacen esta reflexión: "¿En qué se resume todo esto? Los resultados de nuestro ensayo sugieren que la gente es capaz de sostener empecinadamente su creencia en las facultades psíquicas de alguien cuando están convencidos de que *su opinión es la buena*. Es una falacia lógica admitir que con trucos pueden realizarse exactamente los mismos prodigios que realizaría un verdadero psiquista, admitir que la mayoría de los llamados psiquistas son charlatanes y, al mismo tiempo, sostener que un caso concreto (Craig) sea auténtico, y ello con amplio margen de confianza. ¿Tan imbéciles somos los humanos? Sí".

Hace unos años, Scot Morris (redactor de *Omni*, encargado de la sección de Juegos) llevó a cabo un ensayo parecido con un grupo de alumnos de primer año de la facultad de psicología de la Universidad de Southern Illinois, cuyos resultados expuso en el número de primavera de 1980 de *The Skeptical Inquirer*. Morris empezó examinando cuáles eran las convicciones de sus alumnos sobre el tema de la percepción extrasensorial (PES), haciéndoles cubrir un cuestionario. Después, un colega realizó una exhibición de PES, que Morris describe como "impresionante y alarmante"

Tras la actuación, Morris trató de "desprogramar" a sus alumnos. Tenía para ello dos armas a su disposición. Una es lo que él llama "desembaucar". Este proceso, que duraba sólo tres minutos, consistía en revelar el funcionamiento de dos de los tres trucos, junto con la confesión de que el otro también era un truco, "aunque", decía Morris, "no voy a explicarles cómo fue realizado, porque deseo que ustedes experimenten el sentimiento de que nuestra incapacidad para explicar un fenómeno no lo convierte en sobrenatural". La otra arma era una conferencia de 50 minutos para desmitificar la PES, donde se revelaban los secretos de profesionales de la lectura del pensamiento, se daban estimaciones razonables de las probabilidades de coincidencias curiosas, donde se impugnaban mediante diversas razones lógicas y estadísticas ciertos estudios "científicos" de la PES, y donde se aducían ciertas otras razones de carácter práctico, todo ello con la finalidad de provocar fuerte duda sobre la realidad de la PES.

Tras la exhibición, aunque sólo la mitad de los grupos fueron "desembaucados", todos los alumnos asistieron a la conferencia. Seguidamente se hizo un sondeo entre los estudiantes para determinar la intensidad de sus creencias en diversos tipos de fenómenos paranormales. Resultó que los grupos desembaucados creían mucho menos en la PES que los grupos que únicamente asistieron a la conferencia. El nivel promedio de credibilidad de la PES en las clases desembaucadas cayó desde cerca de 6 (moderada convicción) a 2 (fuerte desconfianza), mientras que en las no desembaucadas sólo descendió de 6 a 4 (ligeras reservas). He aquí cómo resume Morris tan sorprendente resultado: "la experiencia desembaucante fue, según parece, crucial. Tres minutos de explicación sobre el método con que habían sido engañados fue más eficaz para hacer brotar el escepticismo en el alumnado que una hora de denuncias de la PES".

Uno de los móviles que Morris tenía para efectuar su experimento era comprobar "si tal ejercicio serviría únicamente para enseñar a los estudiantes a mostrarse críticos con la PES, o si crearía en ellos una actitud de escepticismo más general, como habríamos podido esperar". Por ejemplo, ¿lograría esta experiencia ponerlos en guardia contra la astrología, las mesas de Ouija, o la existencia de fantasmas? Morris sí creyó descubrir una ligera transferencia de la actitud crítica de unos a otros campos, de lo que concluía esperanzado "que al enseñarle a una persona a ser escéptica respecto a una creencia, se consigue hacerla también algo más crítica en otras parecidas, y quizá ligeramente menos crédula de otras disímiles".

A mi modo de ver, la cuestión de la "transferencia del escepticismo" es crucial. De poco vale aprender una lección si tal lección sigue por siempre siendo una lección sobre un caso particular, y carece de aplicabilidad más allá del caso en que fue estudiada. ¿Cuál es, por ejemplo, la lección que debemos sacar del incidente de Jonestown? ¿Nos dice, simplemente, que nunca más deberemos volver a la Guayana tras Jim Jones? ¿O quizá, con mayor generalidad, que debemos ser muy precavidos antes de seguir a un gurú cualquiera a través de medio mundo? ¿Tal vez, que no debemos ir tras ningún gurú, a ningún sitio y por ninguna causa? ¿Nos dice que toda forma de culto es perniciosa? ¿Que toda creencia en salvadores, sean humanos o divinos, es loca y peligrosa? ¿Es verosímil que los cristianos fundamentalistas de la "Mayoría Moral" puedan ver el reflejo de sus actitudes en los musulmanes fundamentalistas, de cuyo fanatismo aborrecen, y que pudieran por consiguiente verse llevados a renunciar a su propio fanatismo? ¿Por qué no? ¿Con qué nivel de generalidad se aprende –o debe aprenderse– una lección?

El Capitán Rayo de Luz, creado por Stalker, expresó su confianza en lograr imbuir a la gente de un espíritu crítico más general, de la capacidad para examinar más lúcidamente las proclamas de paranormalidad, valiéndose para ello de la ridiculización de sus propias "pseudo-ciencias" en miniatura. ¿Tendrá razón? Hay muchos convencidos de la realidad de ciertos tipos de fenómenos paranormales que se burlan de quienes están convencidos de la veracidad de otros tipos. Hay personas que se mofan de los titulares del *National Enquirer* y que al mismo tiempo creen que –pongamos por caso– la meditación trascendental puede permitir la levitación, o que las predicciones astrológicas se hagan realidad, o que los ovnis son visitantes de otros mundos, o que existe la PES. Mucha gente ha dicho: "La mayoría de los psiquistas son, desdichadamente, charlatanes y esto hace verdaderamente difícil reconocer a los *auténticos*". Hay incluso creyentes en embaucadores como Uri Geller que dicen: "Admito que a veces hace trampa, quizás incluso el 90 por ciento de las veces, pero de todas formas, ¡sigo pensando que posee auténticas facultades psíquicas!".

Cuando uno está buscando una señal en medio de un montón de ruido, y cuanto más se atiende y más oído se presta, más ruido se recibe, ¿en qué momento deberemos razonablemente

abandonar la búsqueda y concluir que no hay señales que recibir? Por otra parte, pudiera suceder que a veces sí hubiera alguna señal. El problema es que no queremos precipitarnos a emitir demasiado rápidamente un juicio negativo de carácter general, especialmente cuando las propias opiniones están basadas únicamente en una especie de prejuicio de culpabilidad por asociación. Pues, evidentemente, no todo lo publicado por el *National Enquirer* es falso. El difícil arte consiste en saber cuándo dejar de prestarle atención, en sentir cuándo las pruebas son inexistentes o insuficientes. Para bien o para mal, sin embargo, se trata de una cuestión subjetiva a la que pocas publicaciones han dedicado atención.

*The Skeptical Inquirer* se ocupa de cuestiones que van de lo sublime a lo ridículo, de lo trivial a lo profundo. Habrá quienes digan que es una enorme pérdida de tiempo ocuparse de bobadas tales como la PES u otros de los llamados fenómenos paranormales. Otros, entre quienes me cuento, consideran que todo aquel incapaz de –o no dispuesto a– pensar intensamente sobre los rasgos que distinguen el conocimiento científico de sus muchos sistemas rivales no es en forma alguna un devoto de la verdad. La difusión del disparate es una peligrosa tendencia, a la que es necesario poner coto.

En todo caso, se plantea la cuestión de si *The Skeptical Inquirer* podrá llegar a ser algo más que una gota de agua en un cubo grande. No es de creer que sus redactores se hagan la ilusión de que un día su revista se venda junto al *National Enquirer* en los supermercados. Llevando las cosas al último extremo, ¿podríamos imaginar un mundo donde una revista de desmitificación como *The Skeptical Inquirer* se vendiera por millones de ejemplares semanales, en competencia con otras varias de igual talante, mientras una voz solitaria y valerosa defiende los derechos de lo oculto, a razón de cuatro números al año, que vende a 7500 lectores? ¡Más parece una de las disparatadas historias que tan buena acogida tienen en las páginas del *National Enquirer*! Este ridículo supuesto sirve para poner de relieve la dureza de la banda a que debe enfrentarse el CSICOP.

En cualquier caso, ¿de qué les sirve publicar su revista, si tan sólo van a leerla un puñado de fanáticos anti-oscurantistas, convencidos ya? La respuesta se encuentra, entre otros lugares, en la sección de cartas de la contraportada de cada número. Muchas personas escriben, explicando cuán decisiva ha sido la revista para ellos, sus amigos o sus alumnos. Entre los remitentes de este tipo de cartas de agradecimiento los más frecuentes son profesores de secundaria, aunque también he visto cartas de clérigos, locutores de radio y personas de otras muchas profesiones.

Confío en que, llegado aquí, habré despertado suficiente interés en algunos lectores como para hacerles pensar en suscribirse a *The Skeptical Inquirer*. La suscripción cuesta anualmente 16 dólares, y deben dirigirse a Box 229, Central Park Station, Buffalo, N. Y. 14215 (USA). Por afán de imparcialidad, daré también las direcciones y tasas de suscripción de *The Zetetic Scholar* (Department of Sociology, Eastern Michigan University, Ypsilanti, Mich. 48197; 12 dólares anuales) y del *National Enquirer* (Lantana, Fla. 33464, 13,95 dólares por año).

Indudablemente, nunca seremos capaces de vaciar el vasto océano de irracionalidad en que cada uno de nosotros está inmerso, pero tampoco la ambición de *The Skeptical Inquirer* ha sido nunca tan grande; más bien su intención es ser a modo de boya bien anclada, a la que uno pueda asirse en ese mar tumultuoso. Su intención es promover en tantas personas como sea posible una saludable forma de escepticismo. Como Frazier dice en uno de sus elocuentes editoriales, "el escepticismo no es –pese a una opinión errónea muy extendida– un mero punto de vista. Es, en cambio, ingrediente esencial en la indagación intelectual, un método para determinar y establecer los hechos, cualesquiera que éstos puedan ser y dondequiera que nos lleven. El escepticismo forma parte del método con que la ciencia opera. Todo aquel interesado en la búsqueda del conocimiento, en hacer avanzar la comprensión de cuanto nos rodea, debería –pese a lo imperfectas que siempre resultarán tales empresas– respaldar la investigación crítica, siempre, sea cual fuere el tema y cualquiera que sea el resultado".

Es una lástima que hayamos de estar constantemente defendiendo la verdad frente al asalto desaforado de tantas gentes que no desean pensar; pero, por otra parte, parece como si la confusión en las ideas fuese inevitable, como si formase parte de la naturaleza humana. Puesto a pensar en ello, creo haber leído recientemente en algún sitio que la persona promedio emplea únicamente el 10 por ciento de su cerebro. ¡Hablando de confusión...! ¡Es asombroso! ¡Hasta los científicos han quedado sin habla...!

# Taller y laboratorio

## *Cómo observar el "moteado" característico de la luz láser en distintos tipos de iluminación*

Jearl Walker

Los primeros láseres gaseosos (que aparecieron hace unos 20 años) no sólo produjeron luz coherente, sino que además llamaron la atención por un fenómeno curioso: cuando su luz incidía sobre una superficie, ésta presentaba a veces una apariencia granular o moteada. Esta imagen formada por motas, conocida hoy por moteado, sorprendió a todos, pese a que hacía tiempo que se habían observado imágenes semejantes en superficies iluminadas por luz solar. El moteado aparece siempre que la luz láser se dispersa en una superficie cuyas irregularidades sean del orden de la longitud de onda de la luz.

El moteado producido por la luz solar suele pasar desapercibido porque es muy tenue y carece de contraste y movimiento. Robert N. Sollod, profesor de psicología de la Universidad estatal de Cleveland, me acaba de señalar, sin embargo, lo que considero un caso de moteado cinético producido por luz solar. Este consiste en que, al exponer directamente a la luz solar una cuchara, llena hasta menos de la mitad de café con crema de leche, se contempla un enjambre de puntos destelleantes y repletos de colorido que se mueven animadamente al azar por el líquido. Diría que ese punteado se debe a la dispersión de la luz por las partículas coloidales dotadas de movimiento browniano dentro del líquido. Investigaciones anteriores sugirieron que tal efecto era improbable, si no imposible. Y si mi interpretación es correcta, el experimento de Sollod sería el único en el que podría detectarse el movimiento browniano sin otro medio que nuestra vista pura y simple.

Para explicar el fenómeno podemos valernos de una lámina de vidrio transparente esmerilado. Intercalamos la lámina en la trayectoria de un haz de láser, que después iluminará una pantalla, o un trozo de papel fotográfico, colocado a cierta distancia. Imaginemos el haz compuesto inicialmente por innumerables rayos paralelos, a lo largo de cada uno de los cuales se propaga una onda. Característica particular de los láseres es que el mismo proceso en virtud del cual se hace que los átomos del medio activo del láser emitan luz, asegura que todas las ondas se hallen en fase, es decir, que todas ellas se hallan en el mismo estado cuando cruzan un plano perpendicular al haz. De este tipo de luz se dice que es coherente. La luz procedente de otras fuentes ordinarias, como una bombilla de incandescencia, es incoherente. En este caso, las fases de las ondas que atraviesan el plano imaginario mencionado no mantienen entre ellas una diferencia constante, sino que ésta varía continuamente.

La luz láser que atraviesa nuestra lámina de vidrio se dispersará en la cara esmerilada de la misma. Los rayos dispersados ya no estarán en fase y es casi imposible que se propaguen en la misma dirección. El cambio de fase se debe a las leves variaciones en el espesor del vidrio, dada la irregularidad de la superficie esmerilada. La velocidad de la luz en el vidrio resulta ser menor que en el aire, pues la luz, en el seno del vidrio, emplea cierto tiempo en interacciones con los átomos de éste. Entonces, cuanto más grueso sea el vidrio, tanto más tiempo se perderá en esas interacciones y más tardará la luz en atravesarlo. Además, como la superficie del vidrio esmerilado es rugosa, los rayos que salgan por su superficie habrán empleado en atravesarlo unos tiempos de tránsito diferentes. Por todo ello, los rayos emergerán del vidrio con una gran diversidad de fases.

En la ilustración superior de la página contigua se representa un ejemplo de lo que podría ocurrir. Dos ondas atraviesan una lámina de vidrio en una de cuyas caras hay un "escalón" que representa la rugosidad. Estas ondas penetran en el vidrio y se propagan por su interior exactamente en fase. Dentro del vidrio sus longitudes de onda se reducen por igual (puesto que la velocidad de propagación resulta disminuida); cuando emergen recuperan su anterior longitud de onda. Para simplificar se representan saliendo del vidrio, sin que haya variado su dirección de propagación. A causa de la rugosidad del vidrio, sin embargo, uno de los rayos sale exactamente en oposición de fase con el otro (que es una de las infinitas diferencias de fase que podrían

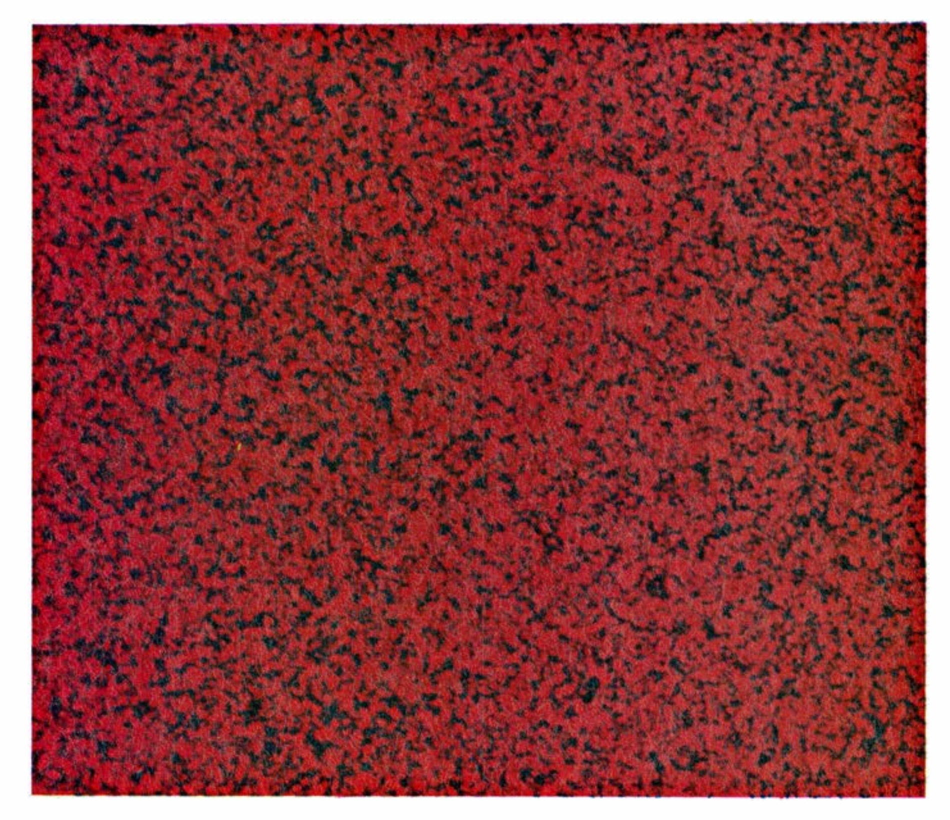


*Figura de moteado generada por la luz de un láser de helio-neon*

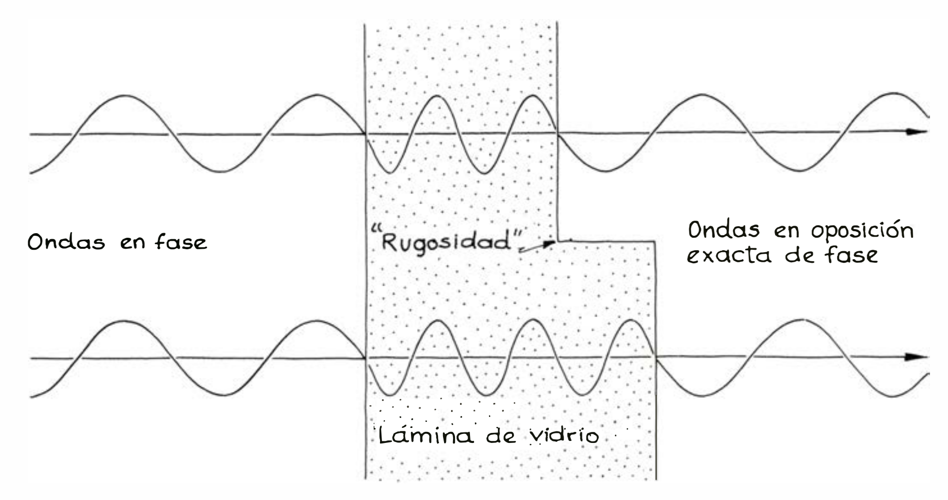
darse). Esta diferencia de fase determina el modo en que se interfieren las dos ondas al llegar a la pantalla.

Consideremos la luz que llega a la pantalla tras salir por los puntos *A* y *B* del vidrio esmerilado. Si las ondas llegan exactamente en fase, se interferirán constructivamente, originando la intensidad luminosa máxima posible. Por tratarse de una superficie rugosa y diferir, además, las distancias de *A* y *B* al punto de la pantalla, resulta poco probable que los rayos lleguen a éste último exactamente en fase; por tanto, la interferencia producirá una luminosidad inferior a la máxima. Si llegan exactamente en oposición de fase, se interferirán destructivamente y el punto considerado aparecerá oscuro.

Todos los puntos del vidrio esmerilado contribuyen con ondas al punto de la pantalla; interferirán unas con otras y determinarán la luminosidad que se observe en él. Los demás puntos de la pantalla recibirán también rayos luminosos, que se interferirán asimismo. En consecuencia, la pantalla aparecerá salpicada de un enrevesado conjunto de zonas luminosas, apagadas y oscuras. Y este es el moteado del láser, que carece de una estructura organizada, en parte porque la superficie del vidrio esmerilado tampoco la posee.

La luminosidad de un punto dado de la pantalla permanecerá constante únicamente si la relación entre las fases de los rayos se mantiene constante. Si por *A* sale una cresta de onda cuando por *B* salga un seno, los rayos procedentes de ambos puntos se interferirán en la pantalla siempre del mismo modo. Pero si varía la relación entre las fases, variará la interferencia, de suerte que una relación rápidamente variable producirá en el punto en cuestión una intensidad luminosa rápidamente variable. Entonces, como la vista y el cerebro promedian la luminosidad a través de un gran número de fluctuaciones de la misma, desaparecerá la imagen del moteado y la pantalla aparentará gozar de una iluminación uniforme.

Cuando el láser se sustituye por una lámpara de incandescencia ordinaria, el moteado se esfuma. En efecto, aunque en un instante cualquiera la relación entre las fases de los rayos salientes del vidrio esmerilado tendrá un valor determinado, al instante siguiente la relación habrá cambiado al azar. El sistema perceptivo promediará esas imágenes y, así, no quedará vestigio alguno de figura interferencial (lo que es una suerte, pues de lo contrario todas las luces que solemos emplear inundarían el espacio circundante con moteados de interferencia).

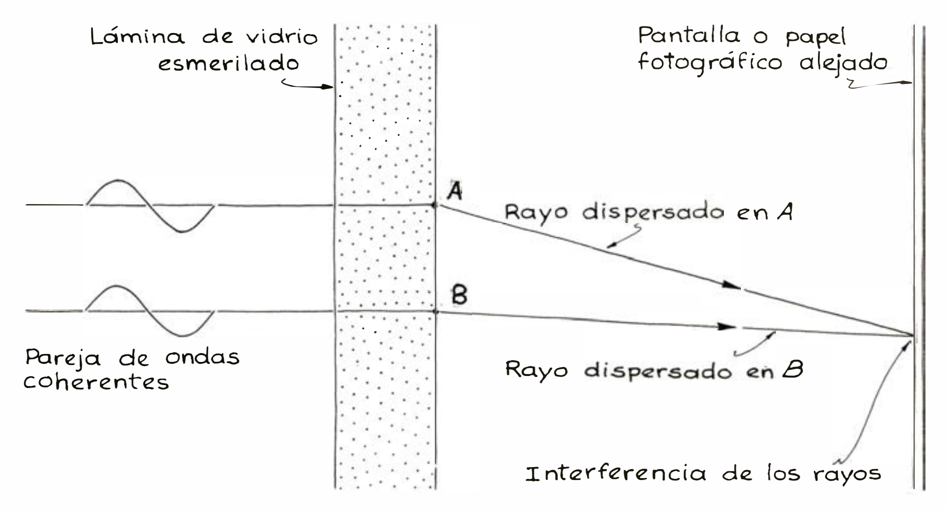



*Cambio de fase en dos ondas de luz láser producido por la rugosidad superficial del vidrio*

Con un manantial luminoso distinto del láser pueden observarse moteados interferenciales, con tal que el manantial ocupe un ángulo suficientemente pequeño dentro del campo visual. Por ejemplo, bajo luz solar contemplaremos un moteado porque el sol constituye una fuente luminosa de sólo 0,5 grados de diámetro. Cumple el mismo cometido un estenope alejado (y aunque éste se ilumine con una bombilla eléctrica, puede aparecer el moteado si el estenope subtiende un ángulo pequeño visto desde la pantalla).

Los moteados interferenciales producidos por la luz solar o un estenope alejado e iluminado con luz blanca son complicados ya que ésta consta de todo el espectro visible. Nos resultará más sencillo considerar luz filtrada, compuesta de una sola longitud de onda. La creación de un moteado interferencial mediante una fuente luminosa distinta del láser depende de la coherencia espacial de la luz y no de su coherencia temporal. Supongamos que nos fuera posible tomar muestras de la luz que pase por un determinado punto camino del vidrio esmerilado. En el punto de muestreo, la luz coherente en el tiempo mostraría una variación uniforme entre crestas y senos, indicando así que la frecuencia de la onda es constante. Este tipo de luz sólo puede generarse en un láser; en la Tierra no se dan fuentes naturales de esas características.

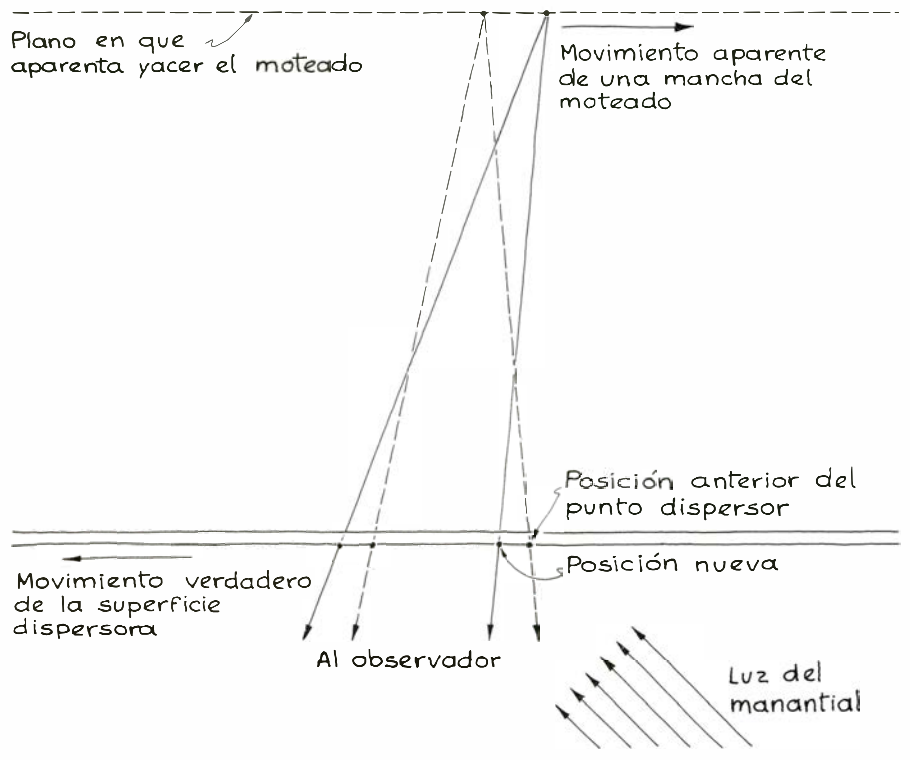
Supongamos también que, simultáneamente, tomamos muestras de luz en otro punto situado a la misma distancia de la fuente. Si acontece que las ondas que pasan por los dos puntos de muestreo mantienen una determinada relación entre sus fases, se dice que la luz es coherente en el espacio (y a veces transversalmente coherente). Por ejemplo, si por uno de los puntos pasa una cresta de onda siempre que por el otro pase un seno, ambas ondas serán espacialmente coherentes. La medida del alcance de la coherencia espacial es la distancia que puede alejarse uno de los puntos de muestreo sin destruir la relación fija entre las fases. El contraste del moteado depende del alcance de la coherencia espacial; por ello, al poseer la luz láser una coherencia espacial



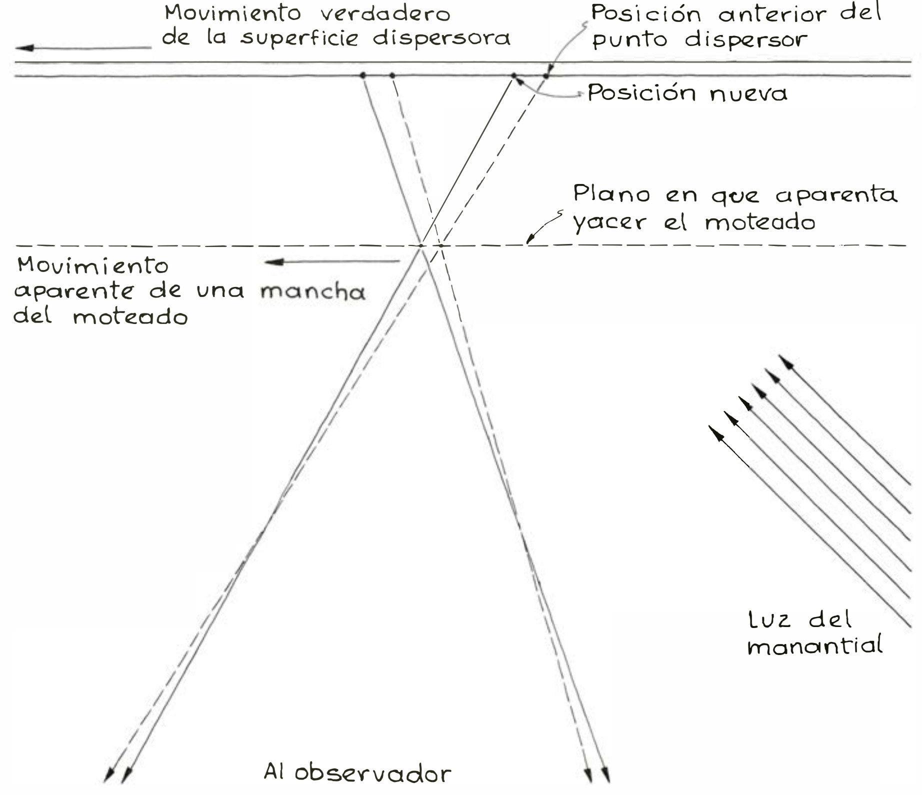

*Interferencia entre dos ondas láser tras atravesar un vidrio esmerilado*

muy amplia, genera moteados de gran contraste.

La luz procedente de un estenope iluminado con una bombilla ofrece cierta coherencia espacial si el estenope se encuentra relativamente alejado de los puntos de muestreo. Cuando la luz que se propague desde un estenope alejado atraviese un vidrio deslustrado camino de una pantalla, creará en ésta una figura de moteado interferencial. Lo que en tal caso ocurre es que, en cada instante, los rayos procedentes del vidrio esmerilado tienen todos una cierta relación de fase. Un momento después, la fase de la luz no guardará relación determinada alguna con la fase de la luz precedente, pero todos los rayos que salen del vidrio seguirán con la misma relación de fase unos con otros. Así se mantendrá la figura de interferencia, y podrá percibirse.




*Movimiento aparente del moteado cuando la distancia focal de la vista del observador es demasiado larga*




*Movimiento aparente del moteado cuando la distancia focal del observador resulta escasa respecto a la posición de la superficie iluminada*

A medida que el estenope se va acercando al vidrio deslustrado, la luz que lo ilumina se torna cada vez menos coherente en el espacio y mengua el contraste del moteado, hasta que la coherencia espacial acaba prácticamente por perderse; en cuyo instante los rayos que salgan del vidrio carecerán de una relación fija entre fases y desaparecerá el moteado.

El moteado interferencial comenzó a estudiarse en la reflexión de la luz láser sobre superficies rugosas. Cuando luz espacialmente coherente se refleja en una superficie de este tipo, los rayos luminosos han recorrido trayectos de longitudes distintas hasta su llegada al observador. Aunque al incidir sobre la superficie pudieran haber estado exactamente en fase, ya no lo seguirán estando todos cuando lleguen al observador; y en la retina de éste se interferirán unos con otros.

La luz blanca procedente de un estenope o la luz solar generan un moteado interferencial polícromo porque son luces de amplio espectro. La diferencia de fase final de los rayos que se interfieren depende parcialmente de sus longitudes de onda; de ahí que surjan figuras de interferencia ligeramente distintas para cada color del espectro. El resultado es una figura llena de colorido, pero falta de contraste.

Eugene Hecht utiliza como elemento para observar moteados bajo luz solar una superficie negra. Rocía de pintura negra mate un papel terso y luego contempla el papel iluminado bajo un ángulo de unos 45 grados. Con un poco de práctica puede verse una figura polícroma finamente granosa sobre la superficie ennegrecida. Hecht indica que una vez que se haya contemplado esa figura se verán moteados en muchos objetos que reciben iluminación directa del Sol; como ejemplos pone "una moneda deslustrada, un capó de automóvil oxidado e incluso una uña".

Vincent P. Mallette describe una figura de moteado creada con la luz de un arco con electrodos de carbón. El moteado aparece si la superficie dispersora se distancia un tanto del arco. A medida que vaya acercándose, la luz que incide sobre ella se hace cada vez menos coherente en el espacio y desaparece el moteado.

El tamaño aparente de los elementos

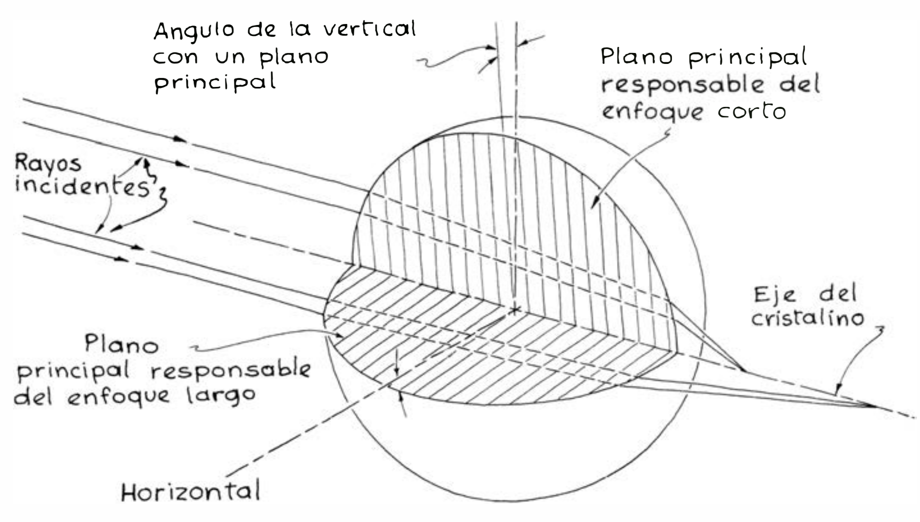
de una figura de moteado procedente de una reflexión depende en parte de la apertura del ojo. Así, cuando la pupila está abierta pueden penetrar en el ojo rayos bajo ángulos comprendidos entre amplios límites, que se interferirán en la retina creando una figura de elementos relativamente pequeños. Con una pupila más contraída, los ángulos bajo los que penetran los rayos varían entre límites más estrechos y en el ojo entrarán menos rayos, que en la retina generarán una figura de interferencia menos complicada formada por elementos de mayor tamaño.

El tamaño del moteado depende, pues, de la apertura con que se observa la figura, ¿Cómo ponerlo de manifiesto? Se examina el tamaño de un moteado producido por reflexión atisbando por una apertura de tamaño variable. Al disminuir la apertura, debe parecer que los elementos crecen de tamaño.

Cuando el observador, o la superficie reflectora sobre la que se ve el moteado, se mueven rápidamente en dirección perpendicular a la visual del observador, desaparece el moteado. Ello se debe a que, dentro del tiempo medio de la percepción humana, el moteado móvil se diluye en lo que parece ser una reflexión uniforme sobre la superficie dispersora. Si el movimiento es lento, dará la impresión de que la figura va de un lado a otro de la superficie. El movimiento puede ser hacia la derecha o la izquierda. En los primeros estudios en torno al moteado se atribuyó el sentido del movimiento al estado de la vista del observador. Si mueve la cabeza hacia la derecha (o se mueve la superficie reflectora hacia la izquierda), el observador miope verá que el moteado se desplaza hacia la izquierda; el hipermétrope, hacia la derecha.

En las primeras explicaciones, este movimiento aparente se atribuyó al paralaje, efecto que se muestra al observar dos objetos, uno cercano y otro más lejos. Si entonces movemos la cabeza hacia un lado, los objetos no retienen su alineación. Esta redisposición de los objetos podría interpretarse como un movimiento aparente de uno de ellos, o de los dos. Si se atribuye movimiento a ambos objetos, el más próximo parecerá moverse en sentido contrario a nuestra cabeza; el más lejano, en el mismo sentido. La verdad es que no se mueve ninguno de los dos, como ya sabremos si tenemos conocimiento previo; pero sin éste, podría creerse que los objetos sí se han movido.

En las manifestaciones de movimiento de un moteado, el movimiento aparente es consecuencia de la acomodación del ojo (o enfoque). Las personas de vista normal y las hipermétropes pueden acomodar la vista para enfocar sobre la retina objetos lejanos. Cuando la percepción carece de datos acerca de la distancia de un objeto, el cerebro admite que los ojos se enfoquen como si los rayos procedieran de una distancia considerable. Y he aquí lo que acontece cuando una persona de vista normal o una persona hipermétrope examinan una figura de moteado interferencial: el moteado es una imagen creada directamente sobre la retina, pero una acomodación de la vista insuficiente produce la ilusión de que la figura está distante.



*Disposición geométrica de los rayos luminosos al atravesar un ojo astigmático*

En esta situación, la pantalla está más cerca del observador de lo que aparenta estar la figura; y cuando el observador mueva la cabeza hacia un lado, el objeto más alejado (la figura de interferencia) parecerá moverse en el mismo sentido. O sea, si la superficie reflectora se mueve perpendicularmente a la visual de un observador inmóvil, el moteado aparentará moverse dentro de la pantalla en sentido contrario.

Los miopes no pueden enfocar objetos alejados. Supongamos una pantalla ubicada más allá de la distancia a la que pueda enfocar un observador miope. Entonces, éste interpretará que el moteado se encuentra a su distancia de enfoque máxima y, cuando mueva la cabeza, el objeto más cercano (el moteado) le parecerá moverse en sentido contrario.

En 1965, Douglas C. Sinclair señaló que esta explicación era incompleta en lo que respecta a las personas de vista normal. En tal caso, y bajo las condiciones adecuadas, el movimiento aparente del moteado depende del color de la luz. En los primeros tiempos de los láseres gaseosos, todos esos dispositivos emitían en el rojo; en los informes acerca del movimiento aparente del moteado se suponía que con los demás colores los resultados serían iguales. Pero, cuando los láseres comenzaron a emitir en el verde y el azul, surgieron las discrepancias.

Sea una persona de vista normal que examina el movimiento aparente de dos moteados interferenciales, primero el producido por un haz de luz láser azul y luego el de un haz de luz láser roja. Le rogamos entonces que acomode la vista a la superficie dispersora, la cual, además, está iluminada por la luz general de la sala, que es blanca. En estas circunstancias, el moteado rojo parecerá encontrarse detrás de la superficie dispersora y el azul delante.

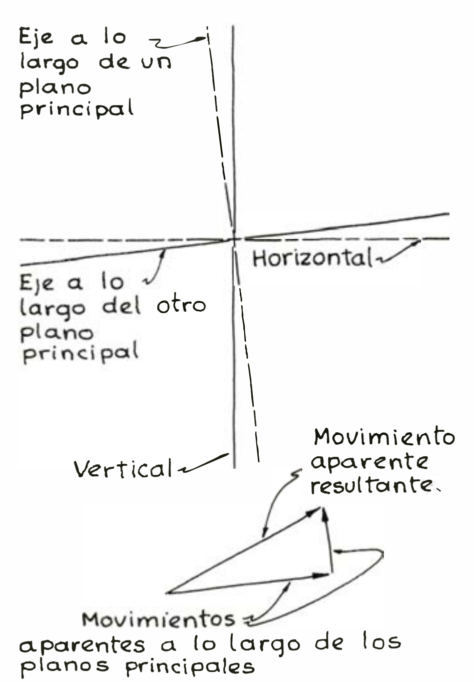
Esta diferencia se debe a la aberración cromática del ojo humano. Efectivamente, la luz de longitud de onda larga (la roja) se refracta menos en el ojo y requiere de éste una distancia focal interna mayor que la luz de longitud de onda más corta (la azul); lo cual significa que la posición aparente de un moteado rojo estará más alejada que la de uno azul.

Cuando el observador mueva la cabeza de un lado a otro de su visual inicial, la figura roja, aparentemente más alejada, se desplazará en el mismo sentido que su cabeza y la figura azul, aparentemente más cercana, en el sentido opuesto. Si el color del láser es próximo al centro de la gama de colores a la que reacciona el ojo, entonces el moteado aparentará estar más cerca de la superficie dispersora. El movimiento aparente de la figura de interferencia que acompaña al movimiento de la cabeza del observador se hace progresivamente menos discernible. Así, cuando la figura parece encontrarse a la misma distancia que la superficie dispersora, la figura no se desplaza como un todo por la superficie según los movimientos de la cabeza del observador, sino que presenta un movimiento caótico, llamado

a veces hervor porque se asemeja a las burbujas que llegan a la superficie del agua hirviendo.

En un examen más detallado del desplazamiento del moteado ha de intervenir el movimiento de los puntos donde se dispersan los rayos responsables de las manchas luminosas de la figura. En la ilustración superior de la página 118 se representa una superficie rugosa que dispersa dos rayos en dirección a un observador. Supongamos que el resultado sea una mancha luminosa en la figura de moteado interferencial. Entonces, la acomodación de la vista del observador hará que los rayos parezcan surgir de un único punto perteneciente a un plano virtual situado detrás de la superficie dispersora auténtica.

Supongamos que esa superficie se desplace hacia la izquierda de la visual del observador, pero no tanto que la mancha luminosa pierda su diferenciación al alterarse la figura. Entonces la ubicación aparente del origen único de ambos rayos se moverá también, pero en sentido contrario al del movimiento de la superficie dispersora real. Cuando la vista del observador esté hipoacomodada a la superficie dispersora (o sea, cuando esté enfocada detras de la superficie), el movimiento aparente del moteado será opuesto al que verdaderamente tenga la superficie dispersora y en el mismo sentido que el movimiento de su cabeza. Cuando la vista esté hiperacomodada se dará lo contrario de lo anterior. La velocidad aparente de la mancha en cuestión depende de su distancia aparente a la superficie dispersora.



*Influencia de un ojo astigmático en el movimiento del moteado*

En ningún caso las manchas realizan un recorrido completo de un lado a otro de la superficie dispersora; poco después de que una cualquiera parezca haber hecho un corto recorrido, desaparecerá porque el movimiento de la superficie dispersora, o de la cabeza del observador, altera la geometría de los rayos que penetran en los ojos. Sin embargo, van surgiendo nuevas manchas que se mueven como lo hacía cada mancha anterior y, por tanto, se cae en la ilusión de que las manchas persisten a lo largo de un recorrido completo por la superficie dispersora.

Cuando la vista está acomodada a la superficie dispersora (o sea, cuando la superficie está enfocada sobre la retina), ni el movimiento de la superficie ni el de la cabeza dan por resultado un desplazamiento ordenado de la figura de interferencia. En lugar de ello, cada una de las manchas de la figura se mueve de un lado a otro de la visual hasta que los ángulos de los rayos dispersados varían tanto que las manchas se confunden. Si prosigue el movimiento de la superficie o de la cabeza, aparecen nuevas manchas, que se mueven en direcciones aleatorias y luego desaparecen; diríase entonces que la superficie ha entrado en ebullición.

Hay investigadores que sugieren que la observación de figuras de moteado interferencial podría reemplazar a los exámenes de la vista usuales en clínicas oftalmológicas, especialmente en el caso de las personas incapaces de leer las letras que se emplean en las pruebas normales. Para ello, de un lado a otro del campo visual del observador se movería una superficie, en la que se dispersaría la luz procedente de un láser de poca intensidad al objeto de crear una figura de moteado. El observador debe entonces acusar el sentido del movimiento de la figura. Seguidamente, en el campo visual se intercalan lentes de graduación cada vez mayor hasta invertirse el sentido del movimiento. Luego, reduciendo la graduación de las lentes, el óptico debe encontrar la graduación para la cual el moteado parece hervir sobre la superficie dispersora. Esa será la graduación de la lente necesaria para corregir la vista del observador.

Algunos observadores dan con otra peculiaridad en el movimiento de los moteados interferenciales. Esta consiste en que cuando el observador padece astigmatismo, la figura puede aparentar desplazarse formando un ángulo con la horizontal a lo largo de la cual el observador mueve la cabeza. Este movimiento bidimensional tiene su origen en el hecho de que un ojo astigmático presenta una distancia focal distinta a los rayos que lo atraviesan según planos meridianos diferentes.

En la descripción normalmente admitida del ojo astigmático se conviene en que éste está atravesado por dos planos principales. Estos planos se representan en la ilustración de la página anterior. Los rayos, inicialmente paralelos, que atraviesan el ojo a lo largo de uno de esos planos imaginarios están focalizados a una determinada distancia dentro del ojo. Esta distancia focal es menor para los rayos que atraviesan el ojo a lo largo del otro plano. Por otra parte, aunque ambos planos sean perpendiculares entre sí, no son necesariamente uno vertical y otro horizontal.

Los ángulos bajo los que penetran en el ojo los rayos que contribuyen al moteado varían entre límites muy amplios. Para simplificar voy a suponer que los rayos atraviesan el ojo a lo largo de uno u otro de los planos imaginarios. Así, cuando el observador mueva la cabeza horizontalmente, las manchas de moteado parecerán desplazarse en parte paralelamente al plano de distancia focal corta y, en parte, paralelamente al plano de distancia focal larga. Entonces, como resultado, el cerebro interpretará que el movimiento se efectúa paralelamente a una recta situada entre ambos planos. Y, como dicha recta estará probablemente inclinada respecto a la horizontal, las manchas parecerán moverse a lo largo de una recta inclinada cuando un observador astigmático mueva la cabeza horizontalmente.

Me ha fascinado la descripción de Sollod en torno al revoltillo de colores observable en una cucharilla de café con crema de leche. En los trabajos anteriores publicados se había desechado la posibilidad de que en las soluciones fueran observables moteados interferenciales. Así, en cierto trabajo se concluía que el moteado no es observable con luz espacialmente coherente, reflejada y dispersada en la superficie de la leche, a menos que ésta se encuentre congelada. En principio el moteado debería ser visible, ya que todas las partículas coloidales de la leche dispersan la luz hacia el observador. Y, como los distintos rayos recorren trayectos distintos al dispersarse, el observador contemplará una figura de interferencia.

El moteado no aparece, empero, porque las partículas coloidales se mueven caóticamente. Este movimiento, llamado movimiento browniano, se debe a las sacudidas que continuamente recibe cada partícula por parte de sus vecinas, que se encuentran en agitación térmica. Es cierto, pues, que en cada instante el conjunto de partículas envía

una figura de moteado al observador; pero la posición inestable de las partículas hace que se difumine la figura durante el tiempo en que la vista promedia la percepción, con el resultado de que la superficie de la leche parece iluminada uniformemente. El moteado podría manifestarse si se moderase el movimiento caótico de las partículas. Al congelarse la leche, el movimiento se detiene prácticamente y, entonces, la figura de moteado resta invariable.

¿Qué decir de la experiencia de Sollod? Mi opinión es que se trata de un caso en que cabe apreciar el moteado de un líquido capaz de fluir libremente. El truco reside en disponer el líquido en una capa muy fina, o diluida, e iluminarla con luz espacialmente coherente. De ese modo la luz, en su camino hacia la superficie reflectora de la cucharilla, se dispersará en un pequeño número de partículas, para volver a dispersarse en otro pequeño número de ellas al regresar hacia el observador, creando así la figura de moteado en la retina. Por otro lado, una capa más gruesa, o más concentrada, interpondría demasiadas partículas en el camino de la luz, con lo que la luz reflejada por la cucharilla sería muy poco intensa y la figura quedaría difuminada.

Podría ser que la finura de la capa de leche influya de otra manera. En una capa delgada, el movimiento browniano de las partículas coloidales es más moderado; y ello no ya porque las moléculas estén más frías, sino porque aumenta la viscosidad de los líquidos al formar capas delgadas. Con un movimiento menos agitado, el tiempo de fluctuación cae entonces dentro de los límites en que es posible discriminar las figuras una a una.

Las motas de luz que aparecen en los ensayos de Sollod presentan color porque las figuras de moteado interferencial dependen de la longitud de onda de la luz. Así, en cierto instante el observador puede encontrarse con la orientación correcta para recibir luz azul de una partícula; en el instante siguiente, la partícula se habrá movido y podría ser que el observador recibiera luz verde de una partícula que ocupe una posición cercana a la que ocupaba la partícula anterior.

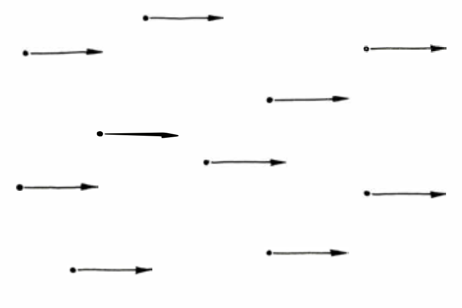
Cuando sostengo una cucharilla medio llena de leche bajo la luz del Sol, no siempre veo a la primera la figura de moteado cinético. Sobre las zonas secas de la cucharilla se presenta una figura de moteado tenue e invariable, como en la mayoría de los objetos bañados por la luz solar. Sólo en el contorno de la masa de leche es ésta sufientemente delgada para crear la figura de moteado cinético. Para estudiarlo mejor, remuevo con suavidad la leche, para que ésta llegue a cubrir la mayor parte de la superficie, y así cuando ésta vuelva a escurrirse hacia la masa principal de la misma, el recubrimiento del resto de la cucharilla quede bien fino. Paulatinamente, las finas capitas de leche remanentes van haciendo surgir moteados cinéticos; al cabo de un rato, las capitas se van secando y las figuras se hacen invariables y menos coloreadas.

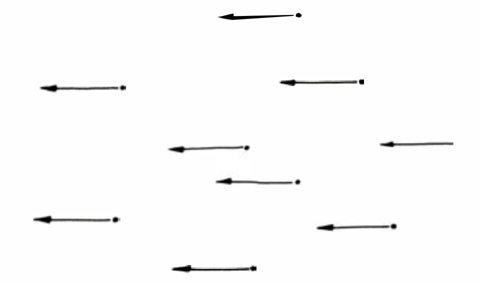
No me es difícil descubrir figuras de moteado cinético en capas de leche finas, cuando éstas se forman sobre superficies reflectoras, así un espejo o una cucharilla como la empleada por Sollod. Pero no lo consigo con superficies pintadas de negro mate; sospecho que la causa está en el modo en que se dispersa la luz en las partículas coloidales. Efectivamente, parece ser que la dispersión es más intensa hacia adelante que hacia atrás, donde se halla el observador; entonces, si la figura de moteado interferencial ha de ser suficientemente intensa para advertirse, la luz dispersada por las partículas tendrá necesariamente que reflejarse en una superficie en dirección al observador. Si esta superficie no produce reflexión de la luz, probablemente resultará un moteado cinético apagado.

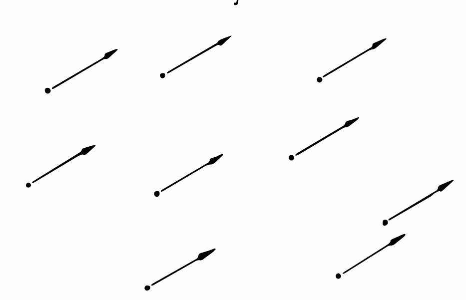
Para comprobar esta hipótesis hice pasar luz solar a través de una capa fina de leche depositada sobre un plato de plástico transparente. Al mirar la luz solar que dejaba pasar el plato desde el reverso de éste, me encontré con el acostumbrado moteado cinético; en el anverso del plato no aparecía moteado alguno. Así pude comprobar que las partículas de leche dispersan la luz principalmente hacia adelante.

Para que se den figuras de moteado interferencial cinético tiene que haber partículas en suspensión de un tamaño muchísimo mayor que el de una micromolécula. Así, una capa fina de agua no da figuras cinéticas, pero una capa fina de agua con un poco de leche disuelta sí las da. Evidentemente el moteado cinético requiere partículas de tamaños del orden de un micrometro.

La dispersión en moléculas de agua, notablemente menores, no genera moteados. Una causa de ello es que las moléculas se distribuyen de manera casi continua; otra es que se mueven más deprisa que las partículas de mayor tamaño. Semejante distribución casi continua, junto con una mayor velocidad, dan por resultado una reflexión uniforme. Las partículas de tamaños superiores a los 100 micrometros no engendran figuras de moteado cinético por resultar demasiado grandes para desencadenar un movimiento browniano; sí producen, en cambio, figuras de moteado estacionario.




*Movimientos aparentes del moteado*

En octubre pasado les describí las figuras de interferencia que pueden contemplarse en los espejos polvorientos y empeñadas. Estas figuras necesitan luz espacialmente coherente, al menos en parte. Pueden servir luz láser, luz solar o la procedente de un estenope. Como observación final les dije entonces que las zonas centrales de la figura, conocida con el nombre de anillos de Fraunhofer, deberían presentar una textura uniforme, en vez de mostrar un veteado nítidamente perceptible. Pues bien, éste forma parte de una figura de moteado creada por la dispersión de la luz en las motas de polvo o gotitas de agua. Lo que aquí ocurre es que las ondas coherentes pueden dispersarse en dos motas o gotitas contiguas para luego seguir camino hasta la retina del observador, donde se interfieren; en virtud de ello, el observador verá claridad, palidez u oscuridad en la posición de las motas o gotitas. La intensidad depende de la separación entre motas.

# Libros

## *La estrella diurna, origen y evolución del hombre y dos puntales de la ciencia medieval europea*

Francisco Sánchez, Arturo Valls, Luis García Ballester y Diego Gracia

DAYTIME STAR. (The Story of our Sun), por Simon Mitton. Charles Scribner's Sons. New York, 1981. Un brillante título, y un subtítulo atractivo, para una obra bien presentada en un formato manejable (21 × 14). Es su autor un astrofísico inglés de merecido prestigio en el campo de la divulgación científica. Recordemos, en esta misma colección, "The Crab Nebula" y "Exploring the Galaxies", amén de múltiples artículos en *New Scientist* y programas para la televisión británica. Desarrolla su trabajo profesional en el Cambridge Institute of Astronomy.

Con un lenguaje fluido y claro desvela al lector cuanto conocemos de nuestra principal estrella, de su pasado, su presente y verosímil futuro. Sin recurrir al formalismo matemático, exasperante para muchos, da una idea global de la física solar. Del "tono" en que está redactado el libro valen como indicadores algunos títulos de capítulo: "The Alchemist's Crucible" (el crisol del alquimista), "Our Sun-Our Future" (nuestro sol-nuestro mañana), etcétera. Refrenda el texto 60 ilustraciones bien seleccionadas, que le confieren viveza y solidez del que sacarán provecho el número cada día más nutrido de astroaficionados. Salpica el texto con citas de culturas arcaicas, aporta datos de los comienzos de la investigación solar y se sumerge en el aprovechamiento del sol como fuente limpia de energía.

Trae, en el primer capítulo, la gavilla de enigmas solares que despertarán la curiosidad del lector y le incitarán a llegar al final. Sitúa luego el tema en el espacio y en el tiempo de la historia humana, donde surgen los problemas gravitatorios y energéticos. Narra las dificultades de la observación solar y las soluciones ideadas por los astrónomos en todo el dominio de las ondas electromagnéticas. Desentraña la estructura de la gran bola de fuego y los mecanismos de producción y transporte de energía. Explica su inserción en la Vía Láctea. La actividad solar, el medio interplanetario y las relaciones sol-tierra constituyen el motivo de sendos capítulos.

En el apartado de defectos cabría señalar la cita desproporcionadamente elevada de investigadores norteamericanos, en detrimento del papel desempeñado por otros observatorios: Meudon, en Francia, Arcetri, en Italia, Crimea, en Rusia, y Kodaikonal, en la India. No alude a las oscilaciones globales, clave para medir el interior solar. Descubiertas en 1974 simultáneamente por un grupo del Observatorio de Crimea y otro de la Universidad de Birmingham, éste prosigue actualmente sus trabajos en el Observatorio del Teide en colaboración con el grupo de física solar del Instituto de Astrofísica de Canarias. Olvido que se hace más patente con el énfasis excesivo puesto en el llamado mínimo de Manden (la presunta desaparición de las manchas solares durante un amplio período del siglo XVII), tan controvertido hoy. Pero desearía acabar este breve comentario subrayando que se trata de una obra excelente, donde se recoge cuanto interesar pueda al lector que carezca de estudios astrofísicos previos. Una buena aproximación, en definitiva, a la "estrella del día". (F. S.)

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL HOMBRE, por F. J. Ayala. Alianza Editorial, Madrid, 1980, 236 págs. Este librito se lee agradablemente de un tirón. En 1982, en que conmemoramos el primer centenario de la muerte del más insigne de los naturalistas de todos los tiempos, Darwin, constituye un buen homenaje a su memoria el reflexionar sobre el contenido de esta obra. Dicho contenido, a nuestro modo de ver, se divide en tres partes claramente diferenciadas. En la primera (capítulo 1) se habla de evolución, en la segunda (capítulos 2 a 4) de genética (de genética general, con escasísimas alusiones a la genética humana) y sólo en la tercera, que representa la mitad del libro, se trata del origen y de la evolución del hombre (capítulos 5 a 9). Disequemos estas tres partes.

La teoría que deberíamos llamar en justicia de Darwin-Wallace, de la misma manera que hablamos acertadamente de la "ley" de Hardy-Weinberg o del efecto Doppler-Fizeau, se analiza de forma sintética y asequible en el primer capítulo; es una introducción de índole histórica donde se explica al lector el conjunto de los más triviales principios evolutivos. Un estudiante de biología o un lector algo conocedor del tema puede ahorrarse la lectura de esta docena de páginas.

En la segunda parte hay una muy aceptable exposición del concepto de variabilidad genética y de su determinación. Se analiza someramente el material hereditario, insistiéndose sobre el papel de las mutaciones como agentes introductores de dicha variabilidad en las poblaciones naturales. A la selección natural se le dedica, merecidamente, todo un capítulo, el tercero, en gran medida para comentar con precisión los tipos de selección direccional, diversificadora (o disruptiva) y equilibradora (pienso, por varias razones que no son del caso aquí, que sería más correcto decir estabilizadora), para terminar con unos párrafos sobre la selección sexual, la familiar y la grupal.

El autor no es antropólogo, sino un genetista profundamente conocedor de la especiación geográfica de la *Drosophila*, problema que domina como pocos, y por ello no es nada extraño que dedique el capítulo más extenso de su obrita al tema de la diferenciación de las razas geográficas animales y vegetales y su eventual paso a especies. El origen de éstas se examina aquí a un nivel muy general, con abundante copia de ejemplos y tras discutir con la extensión posible los conceptos claves de especie,

raza y población que con seguridad quedan bastante claros al lector. Dos pequeños reproches a este capítulo serían los siguientes: la pirueta filosófica con que concluye el mismo y, a nuestro juicio más grave, el párrafo sobre las razas humanas, excesivamente corto (¡una página!) para una obra que se adorna con el título mencionado. Por otro lado, en 1982, apoyarse en el "índice bioquímico" para ejemplificar lo que el autor llama "diferencias étnicas" lo juzgamos totalmente desprovisto de significado biológico y puede resultar confuso para el lector; el "índice bioquímico" no es nada ni informa sobre nada; el mismo "índice" puede ser compartido por dos grupos humanos racialmente alejadísimos, mientras que otros dos grupos biológicamente afines pueden diferir amplísimamente en él; quizás ello lleva al autor a citar un grupo europeo, otro africano y otro intermedio.

La segunda parte del libro sí que trata del origen y de la evolución del hombre anunciados en el título. En el capítulo 5 se desarrollan de manera atractiva, si bien necesariamente breve, los tres mil crones transcurridos desde que aparecieron los primeros fósiles "bacterioides" hasta los tres crones en que se encuentran rastros de los primeros homínidos. Luego asistimos, de forma apresurada, a la enumeración de los "eslabones perdidos" y a la aparición del *Homo sapiens* y su diversificación racial actual. Hemos encontrado varios "puntos negros" en este capítulo. Por ejemplo, la clasificación de la superfamilia *Anthropoidea* (tabla 5-1) está irremisiblemente anticuada a todos los niveles: de familia, de género y de especie. La figura 5-7 es muy confusa para el lector no advertido de que se trata de proporciones del tronco y de las extremidades (p. e., la orientación de los pies lo delata) y es una mala interpretación de un grabado clásico de Adolf Schultz que el gran primatólogo publicó hace cincuenta años y que ha sido profusa e incorrectamente difundido por otros libritos similares de divulgación norteamericanos. Reputamos también poco ilustrativas la tabla 5-2 (densidad de población), la figura 5-14 (distribución geográfica de las razas) y la tabla 5-3 (clasificación racial de Garn), porque su antigüedad conlleva los explicables errores.

Sin embargo, estos reparos serían de poca monta si el texto rechazara tales datos, cosa que no hace. Ello no impide que, poniéndonos en el lugar del lector ignorante de tales cuestiones, el capítulo en cuestión se asimile con claridad, que es un mérito del libro en conjunto. Si adoptamos una postura menos benévola, el capítulo en cambio no acaba de satisfacernos porque nos deja la impresión de que todo ha ocurrido tal y como se describe, de que no quedan problemas, de que la variación y la especiación humana son cuestiones resueltas, de que se trata de la ecuación "evolución de *Drosophila* = evolución humana + *X*" y que *X* es una incógnita ya despejada.

El título del capítulo 6, "La singularidad de la especie humana", nos recuerda el del clásico libro de Medawar "The uniqueness of the individual". Es un extracto elemental comparativo del hombre y de los Anthropoidea a los niveles morfológico, bioquímico y citogenético. Se incluyen asimismo unas cortas disquisiciones sobre la cultura y el origen del lenguaje.

Parece completamente fuera de lugar la inclusión de todo un capítulo sobre ética y religión en una obra que, como ya se ha insistido, se fija por el título unos límites biológicos y no metafísicos. No es una justificación escribir que la ética y la religión presentan ambas un carácter "universal" para dedicarle al tema un número de páginas igual que al capítulo sobre el origen del hombre y mayor que al capítulo anterior y al siguiente. La religión es, parafraseando la conocida cita, el opio del antropólogo que le permite con toda comodidad, e irresponsabilidad científica, tratar de la incógnita *X* aludida como algo conocido y sobrenatural. Luego, bajo el pretexto de que la capacidad ética del hombre tiene unas raíces evolutivas (?) resulta fácil discurrir sobre la aceptación de la autoridad, sobre los códigos morales, justificar la sociobiología, etcétera, casi sin volver a citar la palabra religión. El daño ya está hecho y el lector no maduro en este género de polémicas acepta frases como "¿por qué sólo los seres humanos son religiosos mientras que los demás animales no lo son?" (pág. 188), "la mente humana es lo que radicalmente *–sic–* distingue a nuestra especie de los demás animales" (págs. 188-189), "los hombres... atribuyen la transitoriedad de la vida a poderes sobrenaturales" (págs. 189-190), "se da en la naturaleza biológica del hombre una predisposición hacia las creencias y cultos religiosos" (las mismas páginas), etcétera. Tales afirmaciones se incluyen al final de un apartado y de un capítulo, para así apisonar mejor el terreno mental del lector. Es curiosa la afirmación (pág. 169) de que "ciertos presupuestos como 'no matar' parecen universales". También se recalca, con propósitos no claros, que existen "predisposiciones para aceptar la autoridad" (pág. 170), "una predisposición a aceptar las normas morales prevalentes" (misma página) y se roza el límite (pág. 176) cuando se escribe que "variantes genéticas que predisponían a la aceptación de la autoridad fueron favorecidas por la selección natural y llegaron a establecerse gradualmente en las poblaciones humanas". Hay, pues, dicho sea sin ninguna crispación inquisitorial, abundantes, peligrosas e indemostradas afirmaciones para justificar la supuesta naturaleza sobrenatural de esa inquietante *X* de nuestra evolución.

Los dos capítulos finales, sobre el futuro biológico de la humanidad y el proceso biológico, son valiosos y, por desgracia, breves. El primero de ellos echa una ojeada a los problemas que plantea nuestro devenir como especie y las posibilidades que tiene el hombre de dejar de ser un sujeto pasivo de la evolución. El final desarrolla una idea general del progreso y de la evolución, pero encontramos en él un aire finalista y de aristogénesis ("el hombre es el organismo supremo de la Tierra"; pág. 211) sólo amortiguado por la frase con que concluye el libro: "la humanidad no es la especie más progresiva con arreglo a todos los criterios de progreso posibles".

La valoración, quizá desmesuradamente hipercrítica, que acabamos de hacer del libro de Ayala se sustenta en nuestro convencimiento de que los autores de libros de vulgarización –máxime cuando el título e intención son tan ambiciosos como los del que comentamos– han de hilar muy fino el tejido de sus páginas porque su responsabilidad es mucho mayor que la simple suma del número más o menos elevado de sus lectores. Un libro sobre estos aspectos de nuestra biología, al alcance de la mayoría de las personas medianamente cultas, ha de poseer proporcionalmente mucho más rigor que una monografía destinada a una ínfima minoría de especialistas formados y capaces de discernir el condimento del plato que van a degustar. No hay que dar al lector lo que le gusta sino lo que es, satisfaga o no a su paladar. Puede ser un privilegio de los autores de libros sobre biología humana hacerse ingratos entre sus lectores. Los antropólogos podemos ser capaces de proponer un modelo de hombre a pesar de vivir en la primera civilización de nuestra historia que

parece ser incapaz de ello. Pero a condición de despojar a la antropología de sus restos de metafísica. Ojalá sirva para esta tarea este libro de Ayala denso, claro, didáctico... y polémico. (A. V.)

ALBERTUS MAGNUS AND THE SCIENCES. COMMEMORATIVE ESSAYS 1980. Dirigido por James A. Weisheipl. Toronto, Pontifical Institute of Mediaeval Studies, 1980. XIV + 658 págs. (Studies and Texts. 49). El 15 de noviembre de 1980 se cumplió el 700 aniversario de la muerte del dominico Alberto Magno (*c.* 1200-1280), sin duda alguna una de las figuras humanas y científicas más atractivas de la historia de Europa. Dicho aniversario provocó inmediatamente una serie de homenajes en las comunidades científicas más exigentes. Por una parte, la centroeuropea; por otra, la anglosajona de América del Norte.

Pese a que el liderazgo indiscutible de los estudios sobre la ciencia medieval –y en general sobre la cultura medieval– lo poseían los investigadores del área germana, en los últimos veinte años estamos asistiendo a una auténtica eclosión de trabajos de alta investigación dirigidos por el magisterio, ya indiscutible, de historiadores de la ciencia medieval (me refiero a la ciencia medieval que se realizó en la Europa cristiana) como Thorndike, Clagett, Pearl Kibre, White, Kristeller, Murdoch, Sylla, Weisheipl, Wallace, etcétera, y buen número de discípulos, todos ellos repartidos por Estados Unidos y Canadá. El homenaje a San Alberto Magno –canonizado muy tardíamente (1931) y elegido por Pío XII (1941) como "patrono de quienes cultivan las ciencias de la naturaleza" (¿reflejo de la tardía aceptación plena de la ciencia por la Iglesia católica?)– ha cristalizado en ambas áreas –la germana y la anglosajona– en sendos volúmenes, que reflejan muy bien la situación de los estudios sobre la ciencia y la cultura medieval en ellas. El libro misceláneo publicado por los alemanes (Meyer, G. y Zimmermann, A. *Albertus Magnus Doctor Universalis. 1280/1980.* Mainz, 1980) que no voy a analizar, con ser sólido, carece del frescor, interés y mordiente del que ha editado el Instituto Pontificio de Estudios Medievales de Toronto. Además, el Instituto de Toronto ha centrado el volumen únicamente en los aspectos científicos (= ciencias naturales) de la obra de Alberto Magno, que es como decir de lo más valioso de su obra. Y esto es un doble acierto: porque no existía hasta la actualidad ninguna síntesis extensa –aparte del obligado capítulo de diccionario (por ejemplo, la interesante entrada en el *Dictionary of Scientific Biography*, New York, 1970-80)– donde se estudiase la múltiple actividad científica de ese hombre que supo tener una juventud precozmente fecunda en logros científicos y una vejez –murió a los ochenta años largos– lúcida y científicamente atractiva, y porque tampoco eran frecuentes los trabajos sobre su concreta labor y pensamiento científicos en los últimos años. Como muy bien decía el viejo maestro medievalista E. Gilson, Alberto Magno era famoso pero poco conocido y leído.

En primer lugar, hemos de decir que Alberto Magno fue un innovador y un rebelde; y que su actitud fue consecuencia directa de una concreta instalación ante el mundo derivada de su condición de científico: el irracionalismo, el dogmatismo, el conformismo, la mediocridad, el autoritarismo fueron actitudes que él combatió con la exigencia de la libertad, la crítica continua, la independencia intelectual, una profunda generosidad y honestidad intelectuales, una infatigable capacidad de trabajo acompañada de esa curiosidad intelectual que está en la base de la apertura a cualquier novedad, sin abdicar por ello de la intransigencia ante los aduladores del poder (cualquiera que sea la forma que éste revistiera) o los logreros. Todo ello conforma una ética –la ética del científico–, que identifica en pie de igualdad a Alberto Magno con Einstein o Bertrand Russell.

En un momento –en la Europa cristiana de la primera mitad del siglo XIII– en que la nueva metodología científica de Aristóteles y los logros, por ejemplo, de su obra biológica, conmovieron en sus cimientos el trabajoso edificio levantado sobre los supuestos científicos de San Agustín, Alberto Magno tomó rápido y comprometido partido por la "nueva ciencia" encarnada en la reciente traducción del impresionante *corpus* aristotélico que llegaba del Toledo judeo-árabe-cristiano. Supo poner la lógica y el silogismo –como método de indagación– en su sitio, y planteó de forma clara la prioridad de la *experientia*, el *experimentum* y la *observatio* para indagar en las llamadas ciencias de la naturaleza. Supo decirles a los llamados "lógicos": "*ego tales logicas convenientias in scientiis de rebus abhorreo*". No fue un beato de la autoridad –fácil comodín de los acomodaticios y censores–, que acabó por sofocar la ciencia oficial medieval (y la de todos los tiempos), sino que proclamó la libertad del científico y el valor de la propia indagación. "Para mí, Aristóteles no es un dios que nunca yerra, sino un hombre sometido a error, al igual que yo"; y en su tratado *Sobre los minerales* afirma claramente que "el objetivo de la ciencia natural no es limitarse a aceptar las afirmaciones de otros (las autoridades), sino indagar las causas que operan en la naturaleza". Esa es la auténtica humildad del científico y la base de su antidogmatismo.

Cuando se le esgrime la autoridad de San Agustín frente a los "nuevos" científicos paganos (Aristóteles, Hipócrates, Galeno), no duda en distinguir entre las ciencias teológicas ("*his que sunt de fide et moribus*") y las biomédicas y naturales ("*de medicina et de naturis rerum*"); en las primeras tendrá en cuenta a San Agustín, en las segundas estudiará infatigablemente a los maestros griegos. Cuando aún está fresca la condena de las obras de Aristóteles por las autoridades eclesiásticas, tuvo la audacia y la independencia de dar su primer curso de 1250-52 en Colonia, en una facultad ("*studium*") de teología, sobre el Aristóteles recién traducido por ese otro gran científico medieval que fue Roberto Grosseteste, a quien el historiador de la ciencia británica Crombie ha asociado a los orígenes del método experimental. Con ello quiso afirmar su convicción –que no abandonará– de que la filosofía y la ciencia eran indispensables para los estudios teológicos. El hermoso principio medieval de la unidad de la ciencia tuvo en él a su máximo valedor. Es obvio que su postura no era compartida por la mayoría de los profesores "instalados". Enrique de Gante (+ 1293) se apresuró a acusarle de "impiedad" y de abandono de las ciencias sagradas.

Hablando en términos generales, la concepción del mundo y del hombre propia de un científico cristiano medieval de los siglos XII a XIII le exigía poner el conocimiento de la naturaleza (del hombre y de las cosas creadas) al servicio de la mejor intelección de la Sagrada Escritura constituida en norma de vida para el cristiano. San Agustín, cuyo pensamiento moldeó la metodología científica cristiana hasta el siglo XIII, justifica lo que hoy llamaríamos estudios biológicos por la necesidad que tiene el cristiano de descifrar y aclarar la rica simbología contenida en las Escrituras. Conoceremos mejor, viene a decir San Agustín, y con él los estudiosos medievales, cuál ha de ser el comporta-

miento del cristiano, que Cristo mismo afirma debe ser semejante en astucia al de la serpiente y en prudencia al de las palomas (Mat. 10,16), si conocemos perfectamente la naturaleza y costumbres de las serpientes y de las palomas. De ahí el fuerte carácter moralizante de muchos de los escritos de los científicos medievales. Ello, no obstante, estimuló los estudios biológicos y fue la base que justificó la necesidad para el cristiano de conocer científicamente la naturaleza del hombre –su anatomofisiología– y del mundo en general. San Agustín, en su obra *Sobre la doctrina cristiana*, afirma claramente que "la ignorancia de los animales, de las piedras, de las plantas y de otras cosas, que se aducen en las Escrituras como objeto de comparaciones, hace oscuras las expresiones figuradas". En la misma obra abrió al mundo cristiano el rico caudal de la ciencia griega y de cualquiera, sentando las bases para luchar contra el integrismo y la cerrazón: "El cristiano ha de entender que en cualquier parte donde hallare la verdad, es cosa propia de su Señor".

La biografía de Alberto Magno –como la de otros científicos de su tiempo (Roger Bacon, Roberto Grosseteste, Tomás de Cantimpré, etcétera)– le obligó a tomar partido ante el acontecimiento más decisivo de la Edad Media cristiana latina, desde el punto de vista de la historia de las ideas científicas. Me refiero a la incorporación del "nuevo Aristóteles". San Agustín, por ejemplo –hemos visto–, logró encontrar el modo de armonizar la importancia que para un cristiano debe tener la Revelación con la necesidad que, en cuanto hombre de ciencia, siente por elucidar racionalmente la naturaleza creada. De este modo el científico de comienzos del siglo XIII tiene un camino para estudiar los fenómenos y las creaturas naturales, donde se armonizan las verdades reveladas por la Escritura y los datos obtenidos por la ciencia. El acontecimiento que hizo tambalear ese equilibrio entre ciencia y revelación fue la entrada en el Occidente cristiano de las obras científicas de Aristóteles, Ptolomeo y Galeno durante la primera mitad del siglo XIII. Dichas obras constituían un sistema racional completo –es más, en el caso de Aristóteles, una filosofía total desde la "materia prima" hasta Dios– que explicaba el conjunto del universo en función de las causas naturales y teniendo en la base la autonomía de la razón humana. De ahí que entrase en colisión con la ciencia "normal" del mundo occidental cristiano que pretendía también explicar en su totalidad el mundo, pero apoyándose en los hechos revelados por la Escritura. El rápido y polémico proceso de asimilación de la novedad aristotélica vino marcado por apasionantes enfrentamientos entre los distintos bandos en que se dividieron los científicos e intelectuales cristianos y que marcan la culminación de la universidad medieval –institución en que tuvo lugar el proceso–, y del método escolástico de acercarse a la realidad, que fue el resultado de dicha asimilación.

Alberto tomó partido –como hemos dicho– por el nuevo Aristóteles, planeando hacia 1250 la tarea científica más ambiciosa de toda la ciencia medieval: pretendió ofrecer no sólo los fundamentos de la ciencia natural, sino que aspiró a explicar de forma sistemática la totalidad del saber humano. Y lo hizo al hilo del *corpus* científico aristotélico: desde la *Física* y el *De caelo* hasta el resto de sus obras científicas, biológicas y naturales (*De generatione et corruptione, Meteora, De mineralibus et lapidibus, De anima, Parva naturalia, De vegetabilibus* y *De Animalibus*).

No pretendo ofrecer un resumen de las 22 importantes colaboraciones de este interesantísimo y grueso volumen cuya lectura recomiendo vivamente. Aparte de una introducción sobre el papel de Alberto Magno en las ciencias (E. A. Synan), el volumen se inicia con una excelente biografía científica del dominico alemán (J. A. Weisheipl) y un polémico artículo sobre las relaciones Roger Bacon-Alberto (J. M. G. Hackett). Los padres Ashley y Wallace y E. J. McCullough tratan de aspectos básicos de filosofía natural y física. A continuación hay un grupo de nueve capítulos en los que se analiza los aspectos astronómicos y astrológicos (B. B. Price), alquímicos (P. Kibre), geológicos (J. M. Riddle y J. A. Mulholland), tecnológico-químicos (N. F. George), psicológicos (N. H. Steneck y L. Dewan), fisiológicos (J. Cadden y K. Reeds) y de botánico herbario (J. Stannard) de Alberto Magno. El saber médico y la embriología son estudiados por N. G. Siraisi, L. Demaitre y A. A. Travill. La cetrería por R. S. Oggins; la geometría de Euclides y el pensamiento matemático del sabio dominico por P. M. J. E. Tummers y A. G. Molland respectivamente. Los dos últimos capítulos analizan sendos aspectos de la influencia de Alberto en la psicología de la baja Edad Media (Katharine Park) y en la Padua de los siglos XV-XVI (E. P. Mahoney), indiscutible centro del aristotelismo renacentista italiano. Cierran la obra dos interesantes apéndices: uno, de gran utilidad, en el que se relacionan las obras científicas de Alberto Magno de acuerdo con su probable orden cronológico (J. A. Weisheipl), y otro en la que se ofrece la versión inglesa de la carta apostólica de Pío XII en la que se proclama a Alberto patrono de los científicos.

Una cuidada bibliografía y cinco minuciosos índices (de personas y lugares, de citas y de manuscritos) concluyen este volumen que nos abre una atractiva y estimulante ventana al complejo y vivo mundo de la ciencia medieval a través de uno de sus más notables protagonistas. (L. G. B.)

ARNALDI VILANOVANI OPERA MEDICA OMNIA. Vol. II, *Aphorismi de gradibus*. Edidit et praefatione et commentariis anglicis instruxit Michael R. McVaugh. Publicaciones y ediciones de la Universidad de Barcelona. Granada-Barcelona 1975. Vol. XVI, *Translatio Libri Galieni de Rigore et Tremore et Iectigatione et Spasmo*. Edidit et praefatione et commentariis anglicis instruxit Michael R. McVaugh. Publicaciones y ediciones de la Universidad de Barcelona, Barcelona 1981. De auténtico acontecimiento científico y editorial, sin duda el más importante que en España se haya producido nunca en el concreto e importantísimo campo de la edición de textos médicos medievales, hay que calificar la publicación de estos dos primeros volúmenes de las *Opera Medica Omnia* de Arnau de Vilanova. La empresa es obra del "Seminarium historiae medicinae granatensis", y muy en primer lugar de su director, Luis García Ballester, ya conocido como editor de textos científicos medievales por la publicación del códice C-67 de la Biblioteca Universitaria de Granada, que contiene los libros IV-XII del *De natura rerum* de Tomás de Cantimpré y un *Tacuinum Sanitatis* (Granada 1974). García Ballester ha tenido el buen acierto de asociar a la empresa a los mejores arnaldistas españoles (Miguel Batllori, Juan Antonio Paniagua) y a buenos medievalistas europeos y americanos, como Guy Beaujouan, Gundolf Keil, Heinrich Schipperges, Charles H. Talbot y Michael R. McVaugh.

La demostración de saber histórico y pericia técnica que hace McVaugh en estos dos volúmenes es el resultado de una dedicación de muchos años. El primer tomo se abre con una amplísima introducción, 136 páginas, "The Deve-

lopment of Medieval Pharmaceutical Theory", en la que McVaugh expone de modo hasta hoy inédito, tanto por la cantidad de los datos manejados como sobre todo por la calidad y precisión conceptual que éstos adquieren en sus manos, los problemas fundamentales que se planteaba la farmacología teórica medieval.

Estudia, en primer lugar, los fundamentos conceptuales de esta farmacología (Chapter I, The Conceptual Background of Medieval Pharmacy), en segundo las doctrinas farmacológicas del siglo XIII (Chapter II, Thirteenth-Century Theories of Pharmacy), en tercero el desarrollo de la matematización de la farmacología en la medicina árabe (Chapter III, Arabic Mathematical Pharmacy: Alkindi and Averroes), en cuarto la doctrina arnaldiana tal como se halla expuesta en el libro a cuya edición crítica se dedica este volumen (Chapter IV, Arnald of Villanova and the *Aphorismi de gradibus*), en quinto lugar el análisis de este texto de Arnau en relación con la filosofía escolástica de la naturaleza (Chapter V, The *Aphorismi de gradibus* as Natural Philosophy) y, finalmente, las vicisitudes de la farmacología matemática a lo largo del siglo XIV (Chapter VI, Alkindian Pharmaceutical Theory in the Fourteenth Century). En conjunto esta introducción, en realidad todo un libro, es de tal calidad y erudición que constituye hoy el estudio más importante sobre el difícil tema de la farmacología teórica medieval.

La segunda parte del volumen es la edición crítica del tratadito de Arnau titulado *Aphorismi de gradibus*. Comienza con un breve proemio en que el autor da cuenta de los códices existentes, los cataloga y ordena en dos grupos, justifica su elección del manuscrito M como base de su edición y da razón de las normas que ha seguido en la transcripción del texto, así como las correcciones que se ha visto obligado a introducir, no sólo por razones externas (variantes de otros manuscritos), sino también por razones internas (es decir, por necesidades gramaticales o conceptuales, aún sin el refrendo de ningún manuscrito).

Seguidamente presenta el texto crítico del librito de Arnau (págs. 145-228). Esta segunda parte del volumen se cierra con una interesante serie de "Comentarios" (págs. 229-261) a textos y términos de la obra particularmente dificultosos o significativos. En ellos, McVaugh realiza una labor fundamental, que en un primer momento el historiador echa en falta, ya que la búsqueda de citas explícitas e implícitas, en vez de hallarse en notas a pie de página del texto crítico, se encuentra en estos comentarios. Indaga con gran sagacidad los lugares paralelos y las posibles fuentes de inspiración de Arnau, principalmente Aristóteles, Galeno, Avicena y, muy en especial, las referencias al *Quia primos*, el texto latino del libro de Alkindi sobre los grados de los medicamentos, y la sección del *Colliget* de Averroes dedicada a la farmacología teórica.

McVaugh completa esta indagación de fuentes en dos apéndices, el primero dedicado a ofrecer el texto crítico de la edición latina del *Liber de gradibus* de Alkindi, y el segundo a la sección farmacológica del *Colliget* de Averroes. El libro finaliza con una completa bibliografía sobre el tema y con el índice de manuscritos citados.

El segundo volumen que reseñamos edita la traducción que hizo Arnau de Vilanova del libro de Galeno *De rigore et tremore et iectigatione et spasmo*. En la introducción (págs. 11-38), McVaugh analiza el contenido del libro galénico *Peri tremou*, y lo sitúa en el interior del debate de la medicina helenística en torno a los conceptos de espasmo y tétanos, y su distinción del temblor y el salto (pág. 14). Galeno escribe su libro con la intención de establecer la doctrina definitiva sobre este tema. En buena medida no cabe duda de que lo consiguió, de modo que a partir de entonces la historia de este problema es la historia del citado libro galénico. Al análisis de la difusión y traducción de este libro al árabe y al latín dedica McVaugh el mayor número de páginas de su introducción. En el mundo árabe va a traducirse en el siglo noveno, y los términos "espasmo", "tétanos", "temblor", "rigor", etcétera, van a tener en las grandes enciclopedias médicas árabes un sentido muy exacto, que sólo será conocido en el occidente latino cuando éstas comiencen a ser traducidas al latín, primero en Salerno y después en Toledo. El texto completo del libro de Galeno no se podrá leer en latín hasta que Arnau no lo traduce, desde el árabe, en 1282. Más tarde traduciría otros textos, como el *De viribus cordis* de Avicena y el *De medicinis simplicibus* de Abulzale. La técnica de traducción nos es ignorada por completo. La fidelidad al texto galénico es tan grande, que es posible utilizarla como autoridad para enmendar algunos pasajes corruptos en griego (pág. 33). Ciertos matices de traducción, como el uso de *iectigatio* en vez de *saltus* para traducir el término griego *palmos* y el árabe *ikhtilaj* demuestran la influencia salernitana. La traducción de Arnau no debió difundirse con rapidez por Europa, ya que veinte años después de su redacción aún no es utilizada por su colega de Montpellier Bernardo de Gordon (pág. 34), y en el siglo catorce no llegó a imponerse como un texto importante en las universidades. A partir de 1525 el texto arnaldiano va a ser marginado por las nuevas versiones hechas directamente desde el griego. Ahora *palmos* va a ser traducido por *palpitatio*, y no por *iectigatio/saltus/titillatio*, como en la Edad Media (página 37).

En el análisis de los veinte manuscritos de la obra arnaldina, McVaugh distingue cuatro grupos, y justifica su elección de los manuscritos Hh como base de su edición (págs. 41-44). Bajo el aparato crítico, McVaugh sitúa breves notas en las que llama la atención sobre aquellos pasajes en que la versión latina difiere del original griego. Estas divergencias no tienen por qué deberse al traductor latino, ya que pueden tener su origen en las versiones siríaca o árabe. El libro finaliza con tres índices, uno de nombres propios, otro de términos latinos y otro de códices.

En un principio puede extrañar al lector, como de hecho ha extrañado al autor de este comentario, que la empresa de publicar la edición crítica de las obras médicas de Arnau de Vilanova haya sido acometida por historiadores más que por filólogos, a pesar de que éstos colaboran en el proyecto. El estudio minucioso de estos dos primeros volúmenes demuestra, sin embargo, la enorme importancia que tiene la presencia del historiador en estas empresas, y la necesidad de coordinar los criterios históricos con los puramente filológicos.

Sólo un historiador puede escribir unas introducciones de la altura de las aquí comentadas, interpretar tan acertadamente los problemas históricos y médicos que el texto plantea, poner la debida atención en la búsqueda de las citas implícitas y explícitas, etc. Y sin todo esto una edición, por más que pueda considerarse como impecable desde el punto de vista filológico, no será nunca de veras útil, o al menos tan útil como pudiera y debiera, al historiador de la ciencia y de la medicina de la Edad Media. Esperemos que los próximos volúmenes mantengan este alto nivel filológico e histórico. Lo que no será, sin duda, tarea fácil. (D. G.)

# Bibliografía

*Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:*


## RADIACIONES IONIZANTES DE BAJO NIVEL Y SUS EFECTOS BIOLOGICOS

SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION: REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY. Comité Científico sobre los Efectos de la Radiación Atómica. Naciones Unidas, 1977.

THE EFFECTS ON POPULATIONS OF EXPOSURE TO LOW LEVELS OF IONIZING RADIATION. Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. National Research Council. National Academy of Sciences. National Academy Press, 1980.

THE CONTRIBUTION OF IONIZING RADIATION TO CANCER MORTALITY IN THE UNITED STATES. Seymour Jablon y John C. Bailar III en *Preventive Medicine*, vol. 9, n.º 2, págs. 219-226; marzo, 1980.

EFFECTS OF LOW-LEVEL RADIATION AND COMPARATIVE RISK. W. K. Sinclair en *Radiology*, vol. 138, n.º 1, págs. 1-9; octubre, 1981.

## LAS PISADAS FOSILES DE LAETOLI

MELILITITE-CARBONATITE TUFFS IN THE LAETOLIL BEDS OF TANZANIA. Richard L. Hay en *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 67, n.º 4, págs. 357-367; 15 de diciembre de 1978.

PLIOCENE FOOTPRINTS IN THE LAETOLIL BEDS AT LAETOLI, NORTHERN TANZANIA. M. D. Leakey y R. L. Hay en *Nature*, vol. 278, n.º 5702, págs. 317-323; 22 de marzo de 1979.

PALEOENVIRONMENT OF THE LAETOLIL BEDS, NORTHERN TANZANIA. R. L. Hay en *Hominid Sites: Their Geologic Settings*, dirigido por G. Rapp, Jr., y C. F. Vondra. Western Press, 1981.

## ASI ENTRA Y SALE DE SU HOSPEDADOR UN VIRUS ANIMAL

COATED PITS, COATED VESICLES, AND RECEPTOR-MEDIATED ENDOCYTOSIS. Joseph L. Goldstein, Richard G. W. Anderson y Michael S. Brown en *Nature*, vol. 279, n.º 5715, págs. 679-685; 21 de junio de 1979.

ON THE ENTRY OF SEMLIKI FOREST VIRUS INTO BHK-21. Ari Helenius, Jürgen Kartenbeck, Kai Simons y Erik Fries en *The Journal of Cell Biology*, vol. 84, n.º 2, págs. 404-420; febrero, 1980.

THE BUDDING MECHANISMS OF ENVELOPED ANIMAL VIRUSES. Kai Simons y Henrik Garoff en *The Journal of General Virology*, vol. 50, 1.ª parte, págs. 1-21; septiembre, 1980.

## TITAN

THE PLANET SATURN: A HISTORY OF OBSERVATION, THEORY AND DISCOVERY. A. F. O'D. Alexander. Faber and Faber, 1962.

TITAN. James B. Pollack en *The New Solar System*, dirigido por J. Kelly Beatty, Brian O'Leary y Andrew Chaikin. Cambridge University Press y Sky Publishing Corporation, 1981.

*VOYAGER 1* ENCOUNTER WITH SATURN. *Science*, vol. 212, n.º 4491; 10 de abril de 1981.

## QUIMICA DE LAS LLAMAS

FLAMES: THEIR STRUCTURE, RADIATION AND TEMPERATURE. A. G. Gaydon y H. G. Wolfhard. Chapman and Hall, 1970.

FUNDAMENTALS OF COMBUSTION. Roger A. Strehlow. R. E. Krieger Publishing Co., Inc., 1979.

CHEMICAL KINETICS OF HIGH TEMPERATURE COMBUSTION. W. C. Gardiner, Jr., y D. B. Olson en *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 31, págs. 377-399; 1980.

## LOS QUASARS, SONDAS DEL UNIVERSO DISTANTE Y PRIMITIVO

EL AGRUPAMIENTO DE LAS GALAXIAS. Edward J. Groth, P. James E. Peebles, Michael Seldner y Raymond M. Soneira en *Investigación y Ciencia*, págs. 24-35; enero, 1978.

QUASARS: OBSERVED PROPERTIES OF OPTICALLY SELECTED OBJECTS AT LARGE REDSHIFTS. Malcolm G. Smith en *Vistas in Astronomy*, vol. 22, págs. 321-362; 1978.

OBJECTS OF HIGH REDSHIFT. George O. Abell y P. J. E. Peebles. D. Reidel Publishing Co., 1980.

## VISION DE LOS COLORES EN LOS PECES

THE EVOLUTION OF PHOTOPIC VISUAL PIGMENTS IN FISHES: PART III. W. N. McFarland y F. W. Munz en *Vision Research*, vol. 15, n.º 10, págs. 1071-1080; octubre, 1975.

THE ECOLOGY OF VISION. J. N. Lythgoe. Oxford University Press, 1979.

## SILOS

BIN LOADS. A. W. Jenike y J. R. Johansson. Journal of the Estructural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers; ST. 4, págs. 1011-1039; abril, 1968.

STORAGE AND FLOW OF SOLIDS. A. W. Jenike en *Bulletin* of the Utah Engineering Experimental Station, n.º 123. University of Utah; Salt Lake City, 1970.

SOBREPRESIONES EN LAS PAREDES DE LOS SILOS DEBIDAS AL VACIADO Y EFECTOS PRODUCIDOS POR LA FORMA DE LA TOLVA Y EXCENTRICIDAD DEL VACIADO. J. Ravenet. Tesis doctoral en la Universidad Politécnica de Barcelona; mayo 1974.

SILOS, TEORÍA, INVESTIGACIÓN, CONSTRUCCIÓN. J. Ravenet. Editores Técnicos Asociados, S. A.; Barcelona, 1977.

SILOS, DEFORMACIONES, FALLAS, EXPLOSIONES, PREVENCIÓN DE ACCIDENTES. J. Ravenet. Editores Técnicos Asociados, S. A.; Barcelona, 1978.

SILO PROBLEMS. Juan Ravenet en *Bulk Solids Handling*, vol. 1, n.º 4, págs. 667-679; 1981.

## TEMAS METAMAGICOS

CULTS OF UNREASON. Christopher Evans. Delta Books, 1973.

ESP AND PARAPSYCHOLOGY: A CRITICAL RE-EVALUATION. C. E. M. Hansel. Prometheus Books, 1980.

FLIM-FLAM. James Randi. Harper & Row, Inc., 1980.

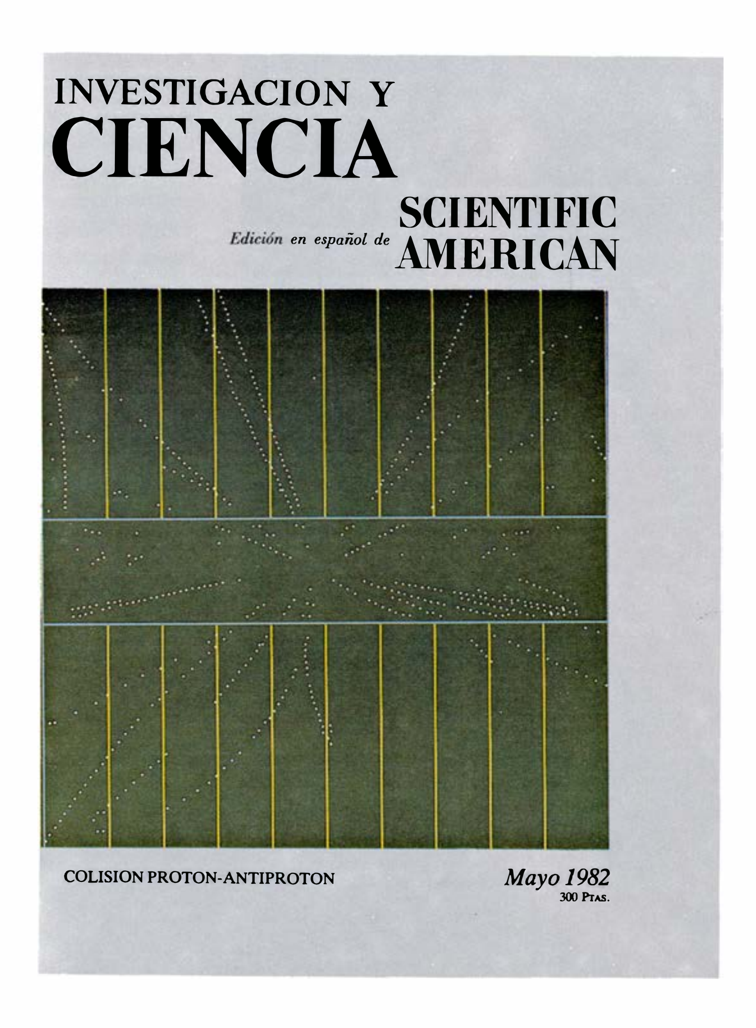
SCIENCE: GOOD, BAD AND BOGUS. Martin Gardner. Prometheus Books, 1981.

## TALLER Y LABORATORIO

THE GRANULARITY OF SCATTERED OPTICAL MASER LIGHT. J. D. Rigden y E. I. Gordon en *Proceedings of the IRE* (Institute of Radio Engineers), vol. 50, n.º 11, págs. 2367-2368; noviembre, 1962.

LASER SPECKLE AND SURFACE ROUGHNESS. W. T. Welford en *Contemporary Physics*, vol. 21, n.º 4, págs. 401-412; julio/agosto, 1980.

# *Seguiremos explorando los campos del conocimiento*




**LA BUSQUEDA DE LOS BOSONES VECTORIALES INTERMEDIOS, por David B. Cline, Carlo Rubbia y Simon van der Meer**
*En teoría, estas partículas elementales de gran masa son necesarias como mediadoras de las fuerzas nucleares débiles. Debieran detectarse pronto como producto de las colisiones entre protones y antiprotones.*

**ANILLOS DE LA CORRIENTE DEL GOLFO, por Peter H. Wiebe**
*La Corriente del Golfo, y otras corrientes, generan remolinos que atrapan agua de propiedades físicas y biológicas distintas de las del mar que los rodea. Los océanos son, pues, mosaicos movedizos.*

**ONCOGENES, por J. Michael Bishop**
*Se trata de genes que causan cáncer. Identificados por primera vez en virus, de su historia evolutiva se deduce que las células normales de los vertebrados poseen genes cuya expresión anormal puede conducir al crecimiento canceroso.*

**APLICACIONES DEL LASER A LA MANUFACTURA, por Aldo V. La Rocca**
*Las herramientas con láser ocupan ya un lugar irremplazable en los procesos de perforación, corte, soldadura, tratamiento por calor y aleación. Sus propiedades únicas sugieren nuevas aproximaciones al sistema formado por el producto y su elaboración.*

**LAS OSCILACIONES SOLARES, por T. Roca Cortés**
*La observación de los modos propios de oscilación del Sol nos proporciona información sobre el estado físico de su interior y abre un nuevo campo de investigación: la sismología solar.*

**SUPERCUMULOS Y VACIOS EN LA DISTRIBUCION DE GALAXIAS, por Stephen A. Gregory y Laird A. Thompson**
*Las exploraciones del corrimiento hacia el rojo en determinadas regiones del cielo han establecido la existencia de tres enormes supercúmulos de galaxias. Las exploraciones revelan asimismo gigantescos volúmenes de espacio casi vacíos.*

**LA "VISION" INFRARROJA DE LAS SERPIENTES, por Eric A. Newman y Peter H. Hartline**
*Serpientes de dos familias pueden detectar y localizar fuentes de radiación infrarroja. Las informaciones infrarroja y de luz visible se integran en el cerebro, dando una perspectiva única y de amplio espectro del mundo.*

**LA COCAINA, por Craig Van Dyke y Robert Byck**
*Quienes consumen la droga por placer, bajo condiciones controladas, no pueden a menudo distinguirla de otras drogas, ni siquiera de placebos. Con todo, los elevados beneficios que rinde su comercio han hecho de la cocaína una mercancía internacional de primer orden.*

